

Mikrostrukturierung von LTCC-Grünfolien durch Prägen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Frau

Dipl.-Ing. Heike Bartsch de Torres (geb. Bartsch)

geboren am 15.11.1968 in Bad Salzungen/Thüringen

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Hoffmann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Müller
3. Gutachter: Dr.-Ing. Annette Kipka

Tag der Einreichung: 30.06.2009

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26.11.2009

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Projektmitarbeiterin am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau im Zeitraum von 2005 bis 2008. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Projekte MIKROFUN, gefördert durch das BMBF und KERAFEMA, gefördert durch das TMWTA erarbeitet. Ich möchte mich daher an erster Stelle bei den Projektträgern für die Finanzierung der Arbeiten und bei allen beteiligten Projektpartnern für die kooperative Zusammenarbeit bedanken. Dankend erwähnen möchte ich die Mitarbeiter der Firma Anton Paar, die mir die Untersuchung der viskoelastischen Folieneigenschaften im Applikationslabor Ostfildern ermöglichten, mir während der Arbeiten freundlich zur Seite standen und in mit anregenden Diskussionen zum Verständnis beitrugen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herr Prof. Martin Hoffmann für seine freundliche Unterstützung während meiner Tätigkeit im Fachgebiet MIKROMECHANISCHE SYSTEME, seine Aufgeschlossenheit gegenüber neuen Ideen und die konstruktiven Anregungen, die viele Denkprozesse in Gang gesetzt haben.

Dankend hervorheben möchte ich weiterhin Herrn Prof. Jens Müller, der als Leiter des Fachgebietes ELEKTRONIKTECHNOLOGIE meine Arbeiten stets wohlwollend unterstützte und das Zweitgutachten übernahm. Während meiner Tätigkeit in seiner Arbeitsgruppe war ich fachlich und persönlich stets gut aufgehoben. Das freundschaftliche Arbeitsklima in der Nachwuchsforschergruppe FUNKTIONALISIERTE PERIPHERIK am ZIK MACRONANO[®] war eine grundlegende Voraussetzung zum Erfolg dieser Arbeit.

Frau Dr. Kipka von der W.C.Heraeus GmbH danke ich für die kooperative Unterstützung im Rahmen der Zusammenarbeit am Projekt MIKROFUN und die Übernahme des externen Gutachtens.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Arne Albrecht bedanken, der durch anregende fachliche Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beitrug, die Ideenfindung innovativ unterstützte und mich bei der Umsetzung motivierte.

Letztlich sind noch viele fleißige Helfer zu benennen, die mir täglich freundlich zur Seite standen. Deshalb ein herzlicher Dank an alle Mitarbeiter des ZMN, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Schließlich möchte ich meinen Kindern Luna und Tupac für die aufgebrauchte Geduld danken und meinem Vater sowie meinen Freunden Kati und Andreas für die unkomplizierte Hilfe im Alltag.

ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand dieser Arbeit ist die Beschreibung und Optimierung des Prägeverfahrens zur Formgebung keramischer Mehrlagensubstrate (LTCC = Low Temperature Cofired Ceramics) im Mikrobereich.

Die im Gefüge ablaufenden Prozesse sowie der Kraftfluss im Komposit werden aus der Werkstoffbeschaffenheit erklärt. Experimentelle Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften kommerziell verfügbarer LTCC-Grünfolien unter Scherbelastung und Druckbelastung werden zur quantitativen Beurteilung von Elastizität, Plastizität und Kompressibilität durchgeführt. Die Herausarbeitung der für den Abformprozess bestimmenden Materialeigenschaften und Gestaltungsfaktoren erfolgt anhand unterschiedlicher Geometrien wie Kavitäten und Feinstrukturen durch visioplastische Versuche und Profilmessungen. Hierauf basiert die im Rahmen der Arbeit erarbeitete phänomenologische Beschreibung des Prägevorgangs.

Unter Nutzung der DoE-Methodik wird der Prägeprozess systematisch optimiert. Der Parameterbereich wird anhand der mechanischen Materialeigenschaften eingegrenzt. Für das Material DP951 ist das Optimum innerhalb des Prozessfensters zur Abformung von Feinstrukturen beschrieben. Zusätzlich werden weitere Ergebniskriterien wie die Formfüllung, stressbedingte Verformung und Entformbarkeit in die Optimierung einbezogen. Als signifikantester Prozessparameter erweist sich die Schmierung. Trockenschmierschichten und Trennmittel werden auf Wirksamkeit und Prozesskompatibilität geprüft. Dabei erweist sich die Nutzung von Leinöl als geeignete Schmiermethode zur Abformung von 80µm tiefen Feinstrukturen mit einer Breite von 50µm. Die Stabilität der Lagetoleranzen als wesentlicher Aspekt der fertigungstechnischen Eingliederung des Prägens in LTCC-Arbeitsabläufe wird anhand einer Studie nachgewiesen. Die ermittelte Positionsgenauigkeit beträgt 0,05 % oder besser.

Funktionelle Vorteile geprägter Mikrostrukturen zeigen sich bei sensorischen und fluidischen Anwendungen. Durch die Oberflächenglättung beim Prägen von Siebdruckschichten steigt das Dichtverhalten von LTCC-Membranventilen auf das Dreifache. Die Integrierbarkeit von Dichtsitzgeometrien in eine monolithisch hergestellte Ventilkammer durch Siebdruck von Karbonpasten ist gegeben. Fluidkanäle sind ohne Fremdstoffe unter ausschließlicher Verwendung von LTCC-Standardtechnologien realisiert. Ihre Integration in freitragende Brücken oder Membranen ermöglicht die thermisch entkoppelte Durchflussmessung in Fluidsystemen bei gleichzeitiger Biokompatibilität. Sensorspulen profitieren von der Gütesteigerung, die sich aus der Querschnittserhöhung geprägter Leiterbahnen ergibt. Die Empfindlichkeitssteigerung von LTCC-Wirbelstromsensoren durch Nutzung der Prägetechnologie um Faktor zwei ist nachgewiesen.

ABSTRACT

The goal of this work is the characterization and optimization of the micro embossing process for the formation of low temperature cofired ceramic multilayers (LTCC) on the micro scale.

Power transmission through the bulk material is explained by the structure of LTCC composites in the green state. The investigation of the mechanical properties of commercially available tapes under shear load and pressure load is carried out with the aim to qualitatively assess elasticity, plasticity and compressibility. The identification of significant material properties and design rules for the formation process is performed with example geometries such as cavities and fine lines by means of visio-plastic investigations and profile analysis. Based on these investigations, a phenomenological explanation of the embossing process is presented.

The embossing process is optimized systematically by the use of DESIGN OF EXPERIMENTS (DoE). The parameter range is deduced from the mechanical material properties. The parameter optimization is shown for the DP951 green tape with the goal to achieve best fine line forming. Additional criteria, such as moulding accuracy, stress induced warping and demoulding behaviour, are investigated. The lubricant is identified as the most significant process parameter. Effectiveness and process compatibility of solid lubrication and release agents are investigated. The use of linseed oil as an adequate lubricant for the moulding of fine line patterns is proved for dimensions of 80µm depth and 50µm width. The stability of position tolerances as an essential requirement for the integration of the embossing step into the manufacturing sequence is proven. This study shows the position accuracy to be 0.05% or better.

The functional advantages of embossed micro patterns are useful in sensor and fluid applications. The surface smoothing produced by embossing screen printed metallizations improves the sealing of LTCC membrane valves by a factor of three. Such valve seats are monolithically integrable into extended ceramic valve chambers with a diameter of 10mm by the use of carbon black screen printing into the cavity. The manufacturing of fluidic channels without any auxiliary material and the exclusive use of LTCC standard technologies is demonstrated. Their integration into cantilever bridges facilitates the thermal decoupling of thick film sensor elements inside of fluid systems and thus permits the flow measurement of biological reagents.

Sensor coils benefit from the improvement of the quality factor, which results from the enlarged conductor cross section of embossed lines. The sensitivity of LTCC eddy current sensors is improved by a factor of two by the use of embossed fine line conductors in comparison with screen printed coils.

INHALT

Danksagung	I
Zusammenfassung	II
Abstract.....	III
Inhalt.....	V
 1 Einführung	
1.1 Motivation.....	1
1.2 Stand der Technik.....	2
1.3 Prägen von LTCC-Grünfolien	3
1.3.1 Einordnung des Verfahrens	3
1.3.2 Der Werkstoff LTCC.....	4
1.3.3 Kraftleitung beim Umformen von LTCC-Grünfolien.....	7
1.4 Grundlagen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten beim Umformen.....	8
1.4.1 Spannungen.....	8
1.4.2 Fließbedingung	9
1.4.3 Technische Dehnung.....	11
1.4.4 Umformgrad (logarithmische Dehnung).....	11
1.4.5 Arbeit.....	12
1.4.6 Besonderheiten verdichtbarer Materialien	13
Definition Verdichtung, Verdichtungsgrößen	13
Formänderung verdichtbarer Festkörper.....	14
Energetische Betrachtungen	16
1.4.7 Schwindung.....	18
1.5 Beschreibung viskoelastischer Eigenschaften von LTCC-Folien.....	20
1.5.1 Kriechverhalten.....	20
1.5.2 Komplexe Darstellungsweise	22
1.5.3 Variation der Belastung.....	22
1.5.4 Variation der Scherrate	23
1.5.5 Variation der Temperatur.....	24
1.6 Präzisierung der Aufgabenstellung.....	24
 2 Experimentelle Untersuchungen an LTCC-Folien	
2.1 Auswahl verfügbarer Grünfolien	27
2.2 Untersuchung des Feststoffanteils	28
2.3 Viskoelastische Eigenschaften von LTCC-Grünfolien.....	30
2.3.1 Versuchsanordnung und Probenpräparation	30

	Amplitudenversuche	31
	Temperaturversuch	36
	Frequenzversuch	36
	Kriecherholungsversuche	37
2.3.2	Diskussion der Ergebnisse	38
	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	38
	Einfluss der Schergeschwindigkeit	39
	Kriech-Erholungs-Verhalten	39
	Temperaturabhängigkeit der Moduln	40
	Einfluss der Verdichtung auf die Moduln	41
2.4	Flachsichtstauchversuch	42
2.4.1	Versuchsziel	42
2.4.2	Versuchsdurchführung	42
2.4.3	Aufbereitung der Messdaten	43
2.4.4	Diskussion der Ergebnisse	45
2.5	Verdichtung, plastische Verformung und Schwindung	48
2.5.1	Versuchsziel	48
2.5.2	Versuchsdurchführung	49
2.5.3	Aufbereitung der Messdaten	50
	Abmessungsänderungen	50
	Umformgrad und Verdichtungsgrad	51
	Spezifische Umformarbeit und Verdichtung	51
	Kompressibilität und Volumenverdichtung	56
2.5.4	Diskussion der Ergebnisse	56
	Abmessungsänderungen	56
	Plastische Verformung und Verdichtung	57
	Verdichtungsverhalten	57
2.6	Zusammenfassung der Materialeigenschaften	58
2.6.1	DP951	58
2.6.2	CT700	58
2.6.3	BGK	58
 3 Fertigungstechnische Aspekte		
3.1	Einordnung der Arbeiten	59
3.2	Werkzeugfertigung	60
3.2.1	Überblick	60
3.2.2	Herstellungsprozess für Siliciumwerkzeuge	62
3.2.3	Galvanisch abgeformte Werkzeuge aus Nickel	64
3.2.4	Trennmittel zur Schmierung	65

3.3	Prozesscharakterisierung mit statistischer Versuchsplanung	66
3.3.1	Vorbetrachtungen.	66
3.3.2	Systemanalyse	66
3.3.3	Versuchsplanung	68
	Planmatrix	68
	Auswertekriterien	69
	Versuchsablauf	70
3.3.4	Ergebnisse und Diskussion	72
3.4	Lagetoleranzen	73
3.5	Füllen mit Pasten	75
3.6	Lamination fluidischer Strukturen	77
3.7	Prozesskontrolle zur Herstellung verdichteter Brücken.	78
3.7.1	Spannungsanteile und Deformation	78
3.7.2	Matrixexperiment zur Quantifizierung der Spannungseinflüsse. . . .	80
3.7.3	Kompensation der Einflüsse	81
 4 Mikroformung durch Prägen		
4.1	Vorüberlegungen.	83
4.1.1	Einordnung der Versuche	83
4.1.2	Spannungsverlauf bei uniaxialem Druck	83
4.1.3	Ähnlichkeitsbetrachtungen	84
4.2	Experimentelle Untersuchungen.	87
4.2.1	Layoutbeschreibung und Umformwiderstand.	87
4.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung.	90
4.2.3	Abformung von Kavitäten.	92
4.2.4	Feinstrukturen	97
4.2.5	Horizontale Schwindungsverteilung	102
4.3	Phänomenologische Beschreibung des Prägevorgangs	103
 5 Anwendungsbeispiele		
5.1	LTCC-Induktivitäten mit geprägten Leiterbahnen	105
5.1.1	Einordnung der Arbeiten.	105
5.1.2	Thermische Eigenschaften und HF-Eigenschaften	105
5.1.3	Streifensensor	107
5.2	Anwendungen in Fluidsystemen.	109
5.2.1	Ventilstrukturen in LTCC-Fluidsystemen	109
5.2.2	Integrierter Durchflusssensor für biologische Substanzen	113
 6 Ausblick		

Anhang	I
A 1 Sinterprofile	I
A 1.1 PEO - Profil DP951	I
A 1.2 Nabertherm L3/S, Profil DP 951	II
A 1.3 Nabertherm - Profil CT700	II
A 1.4 Nabertherm - Profil BGK	II
A 2 Geräteliste	III
Literatur- und Quellenverzeichnis	V
Variablen und Formelzeichen	XI
Thesen	XVII
Erklärung	XIX

1 EINFÜHRUNG

1.1 Motivation

Hochpräzise Fertigungsmethoden, die der klassischen Feinwerktechnik entlehnt sind, ergänzen klassische, auf Halbleitertechnologien basierende Mikrotechnologien. Damit steht dem Entwickler ein breites Angebot an Funktionsmaterialien zur Realisierung komplexer mikrotechnischer Produkte bereit. Kostensenkungen durch Massenproduktion machen diese Produkte einem stetig wachsenden Nutzerkreis zugänglich [SCH05, BAL05].

Replikationsverfahren zur Fertigung hoher Stückzahlen werden auf vielfältige Werkstoffe angewandt. Neben dem Mikrospritzgießen ermöglicht das Heißprägen von Kunststoffen die Formgebung dieser vielseitigen und kostengünstigen Werkstoffgruppe mit hoher Präzision, es existieren bereits Ansätze zur Beschreibung der Abformung durch die Finite Elemente Methode (FEM) [YON07]. Fluidische Funktionsteile mit hoher Oberflächenqualität werden in Kunststoff geprägt [LI08, YOU08]. Heißprägeverfahren dienen auch zur Strukturierung von Gläsern, beispielsweise angewendet als Linsen-Arrays [PAN07].

Metalle kommen zum Einsatz, wenn hohe Temperaturwechselbelastungen bei guter thermischer Leitfähigkeit und Alterungsbeständigkeit sowie gute elektrische Leitfähigkeit gefordert werden. Neben formgebenden Verfahren wie Mikro-Metallspritzgießen (MIM) sind Bleche durch Mikroprägen formbar [MIM09, RAT03].

Keramiken zeichnen sich durch Korrosionsbeständigkeit, große Härte und Temperaturfestigkeit aus. Verfahren wie Mikrospritzgießen oder Mikro-Pulverspritzgießen eignen sich aufgrund der hohen Werkzeugkosten zur Herstellung von Mikrobauteilen in sehr großen Stückzahlen. Das Prägen keramischer Massen bietet hierzu eine Alternative, die sich durch die vergleichsweise niedrigen Maschinen- und Werkzeugkosten bereits bei Kleinserien wirtschaftlich zum Strukturieren flächiger Bauteile eignet. Der Materialfluss ist gegenüber dem Spritzgießen gering, woraus spannungsarme Bauteile resultieren [GER06, Seite 178].

Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) sind Mehrlagenkeramiken, die bei Temperaturen um 850°C versintern. Diese im Vergleich zu High Temperature Cofired Ceramics (HTCC) niedrige Sintertemperatur wird durch Beimischung niedrig schmelzender Gläser erreicht. Dadurch können elektrisch gut leitende Metalle wie Gold oder Silber mit Dickschichttechnologien aufgebracht und in einem Prozessschritt mit dem Keramikträger unterhalb ihres Schmelzpunktes versintert werden. Das parallele Versintern von Keramik und Leiterzügen in einem Brand wird als Cofiring bezeichnet. Klassische Anwendungsgebiete von LTCC-Schaltungsträgern liegen in der Hochfre-

quenztechnik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik mit hoher Zuverlässigkeit oder dort, wo hohe Einsatztemperaturen und extreme Umweltbedingungen besondere Anforderungen an den Schaltungsträger stellen.

Die Materialgruppe der Mehrlagenkeramiken eignet sich zur Herstellung hochintegrierter, leistungsfähiger und zuverlässiger Schnittstellen für Mikroelektromechanische Systeme (MEMS Packaging) [XMA09]. Ein breites Spektrum an Verbindungstechnologien erlaubt die Montage und Kontaktierung von Siliciumschaltkreisen und MEMS-Baugruppen. Chemische Beständigkeit und Temperaturbelastbarkeit sowie die einfache fertigungstechnische Umsetzung 2,5-dimensionaler Geometrien ermöglichen die Herstellung mikrofluidischer Systeme [KNI01, GOL06, GON02, GRO08]. Durch die elektrische Funktionalisierung entstehen komplexe fluidische SYSTEM ON PACKAGE-Lösungen, welche Sensoren oder Aktoren als Dickschichtelemente beinhalten [LUN99, GON99, GIL00, LAI05].

Ergänzt werden klassischen LTCC-Materialien durch Folien und Pasten, die weitere Funktionsintegration auf einem technologischen Niveau erlauben. Keramische Ferrite hoher Permeabilität sind als Folienmaterial verfügbar und dienen der Flussleitung in magnetischen Kreisen [MIK09]. Etabliert ist die Mehrlagenkeramiktechnologie bei der Herstellung piezoelektrischer Präzisionsantriebe basierend auf Perowskiten [PIC09]. Auch piezoelektrische Pasten sind verfügbar [IKT09]. Damit sind Aktorfunktionen in keramischen Mikrosystemen realisierbar.

LTCC-Grünfolien stehen kommerziell als Keramik-Halbzeuge zur Verfügung, die durch eine etablierte Technologie kostengünstig zu elektronischen Schaltungsträgern hoher Zuverlässigkeit verarbeitet werden können. Prägen ergänzt die Palette der üblichen LTCC-Technologien wie Stanzen oder Laserschneiden und ermöglicht Feinstrukturierung bei sehr guter Oberflächenqualität. Der 2,5-dimensionale Gestaltungsspielraum klassischer LTCC-Technologien erweitert sich durch die von der Foliendicke unabhängige Strukturhöhe auf 3-dimensionale Geometrien. Das Verfahren erlaubt die Strukturformung in LTCC-Werkstoffen vom Meso- bis in den Mikrobeereich.

1.2 Stand der Technik

Motiviert durch die dargelegten Vorteile beschäftigen sich mehrere Arbeiten mit dem Prägen von Mehrlagenkeramiken. [PAR00] untersucht den Einfluss des Binderanteils von Grünfolien auf ihre Zugfestigkeit und das Prägen von schmalen Stegen. Weiterführend werden unter Nutzung dieser Technologie Barrieren mit einer Breite von 50µm und einer Höhe von 100µm mit einem Abstand von 165µm geformt [KIM00] und daraus vakuumdichte Kammern für HDTV-taugliche Displays gefertigt [MUN00].

Zur Verbesserung der Stromtragfähigkeit von LTCC-Leiterbahnen werden geprägte Strompfade mit Siebdruckpasten gefüllt. Dadurch wird eine Vergrößerung des Leiterbahnquerschnittes gegenüber gedruckten Strompfaden erreicht, die eine Verringerung des Flächenwiderstandes bewirkt [ALB03].

Eine Anwendung beschreibt die Senkung der Übertragungsverluste von HF-Leiterzügen, indem über großflächige Kavitäten, geprägt mit einer Tiefe von $100\mu\text{m}$, Goldleiterbahnen aufgespannt werden [VAE04].

Ein großer Vorteil der Prägetechnologie gegenüber Stanz- und Lasertechnologien ist die sehr hohe Oberflächenqualität der Strukturen. Daher betrachtet eine Reihe von Veröffentlichungen Herstellungsmöglichkeiten für Fluidkanäle. In [RAB06] werden geprägte Strukturen in einem Null-Schrumpf-Prozess gesintert und so geschlossene Kammern und Kanäle hergestellt. Eine weitere Methode zur Erzeugung von Kanälen mit Null-Schrumpf-Techniken beschreibt [HLA07]. Hier wird die Verringerung der Kanalhöhe beim Sintern untersucht, welche im beschriebenen Prozess 50% beträgt.

Weitere Arbeiten betrachten die Prozessführung. Der Einfluss der Prozesstemperatur auf die Abformung von Linien und Stegen mit variabler Größe wird in [SHA08a] untersucht. Diese Arbeitsgruppe nutzt einen Walzprozess zum Abformen von Nickel-Folien in LTCC-Folien [SHA08b].

In den zitierten Arbeiten wird der Prägeschritt anwendungsbezogen betrachtet. Prozessführungen und Abformergebnisse sind beschrieben. Es wird deutlich, dass Prägen eine vielversprechende Methode zur Mikrostrukturierung von LTCC-Grünfolien ist, die einer genaueren Untersuchung bedarf.

1.3 Prägen von LTCC-Grünfolien

1.3.1 Einordnung des Verfahrens

Fertigungsverfahren werden gemäß DIN 8580 nach Art der Krafteinwirkung auf das Werkstück gegliedert. Bild 1-1 zeigt ein Schema der Einteilung. Das Prägen ist der Untergruppe Druckumformen zugeordnet und stellt nach DIN 8583 ein Eindringen mit geradliniger Werkzeugbewegung ohne Gleiten dar. Ein Werkzeug wird senkrecht in ein nicht bewegtes Werkstück gepresst.

Mikroprägen wird in dieser Arbeit als Verfahren verstanden, bei dem Strukturen mit mindestens zwei Dimensionen im Sub-Millimeter-Bereich abgeformt werden. Typischerweise werden Geometrien von einigen $10\mu\text{m}$ bis $500\mu\text{m}$ parallel in einem Prozessschritt auf einem Nutzen mit bis zu 8 Zoll Kantenlänge erzeugt. Die erforderliche uniaxial wirkende Umformkraft wird durch hydraulische Gesenkpressen aufgebracht. Das Werkstück wird zwischen den Pressenstempeln ohne Relativbewegung in Folien-ebene gestaucht.



Bild 1-1: Einordnung des Prägeverfahrens nach DIN 8580.

1.3.2 Der Werkstoff LTCC

Low Temperature Cofired Ceramics sind anorganische Werkstoffe, die zur gezielten Einstellung gewünschter Eigenschaften eine keramische Füllkomponente im Verbund mit einer Glaskomponente nutzen, wobei die Zusammensetzung das Versintern des Verbundwerkstoffes bei Temperaturen unterhalb der Sintertemperatur der Keramikkomponente erlaubt. Im Grünzustand liegen alle Komponenten in Pulverform vor und werden durch ein Polymer in Folienform fixiert, wodurch eine einfache Formgebung und Verarbeitung ermöglicht wird.

Typischerweise dienen Lösungsmittel basierte Systeme wie Ethylzellulose, Methylzellulose, PVA, PVB oder Acrylate als Binder für LTCC-Grünfolien, Lösungsmittel sind Isopropylalkohole [IMA00, Seite 106]. Der Binder muss der Grünfolie ausreichende Festigkeit und Flexibilität verleihen, um gute Handhabbarkeit während der Stanzprozesse und des Siebdrucks zu gewährleisten. Zur stabilen Prozessierung ist eine hohe Alterungsbeständigkeit sowie die Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen erforderlich. Außerdem muss die Kompatibilität von Folienbinder und Pastenbinder des Materialsystems beachtet werden, d.h. ihre Komponenten dürfen untereinander nicht löslich sein. Während der Lamination sollen die Binder unter Druck- und Temperatureinfluss sehr gute Haftung zeigen und dürfen nicht ausgasen. Sie müssen beim Sintern rückstandsfrei Verbrennen.

Der Feststoffgehalt von LTCC-Schlickern beträgt bis zu 60%. Beim Foliengießen ist die Benetzung der Pulverbestandteile zu sichern. Schaumbremser, Dispergatoren und Weichmacher werden dem System zugesetzt und bestimmen das Gleichgewicht zwischen VAN-DER-WAALS-Kräften, elektrostatischen Kräften sowie sterischen, hydrodynamischen und BROWNSCHEN Wechselwirkungen und somit Rheologie und

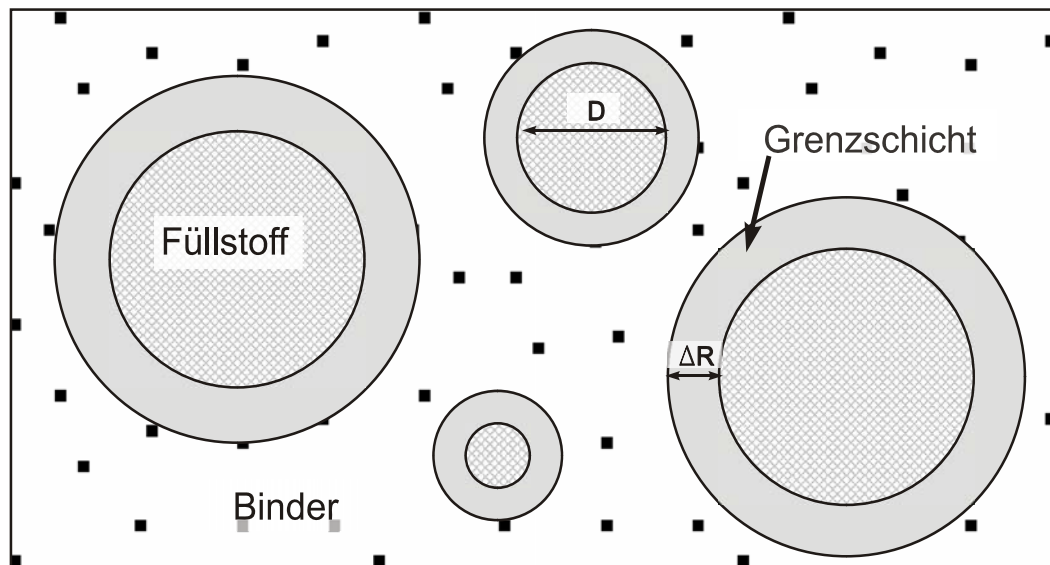


Bild 1-2: Schematische Darstellung der Polymermatrix mit Füllstoffen.

Gießverhalten der Suspension (Schlicker) [GUP00, Seite 246ff]. Bild 1-2 zeigt eine schematische Darstellung suspensierter Partikel. Um den Feststoff bildet sich eine Grenzschicht, die das Benetzungsverhalten zwischen Binder und Füllstoff bestimmt. Der Einfluss von Füllstoffen auf das Fließverhalten wird durch die relative Viskosität η_r beschrieben. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Viskosität der Suspension η_S zur Viskosität des Binders η_B . Es existieren eine Reihe empirischer Ansätze zur Beschreibung der Viskosität in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt Φ [SHE99, Seite 137ff und 247ff sowie BAR89, Seite 119ff]. Ein sehr einfacher Zusammenhang ist in [GAU01, Seite 181] formuliert:

$$\eta_r = \frac{\eta_S}{\eta_B}; \quad \eta_r = 1 + k_E \Phi + k_H \Phi^2 + \dots \quad (\text{GL 1-1})$$

Für niedrige Füllgrade Φ wird die Reihe nach dem linearen Glied abgebrochen und ergibt die bekannte EINSTEIN-Gleichung, in der die Konstante k_E den Einfluss der Partikelform beschreibt. Weitere Glieder erfassen die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen bei höheren Füllgraden. Die Konstante k_H steht für das quadratische Glied, höhere werden je nach Genauigkeitsforderung eingeführt. Die mathematische Abhängigkeit zeigt deutlich, dass sich die Viskosität stark mit steigendem Füllgrad erhöht.

Der maximale Feststoffanteil Φ_{\max} in LTCC-Folien ist eine Funktion der Korngröße und Größenverteilung der Pulverkomponenten. Bild 1-3 zeigt die Abhängigkeit des Partikelabstandes vom Bindergehalt in LTCC-Schlickern. Bei geringem Binderanteil umhüllt der Binder die Partikel nur teilweise, die Festigkeit ist gering. Steigt der Binderanteil, werden die Feststoffe eingehüllt (Bereich I der Kurve in Bild 1-3). Der Partikelabstand wird durch die Grenzschichtdicke ΔR zwischen Binder und Teilchen bestimmt. Bei weiterer Erhöhung des Binderanteils werden Poren reduziert. Erst wenn die Hohlräume gefüllt sind, vergrößert sich der Partikelabstand (Bereich III der Kurve).

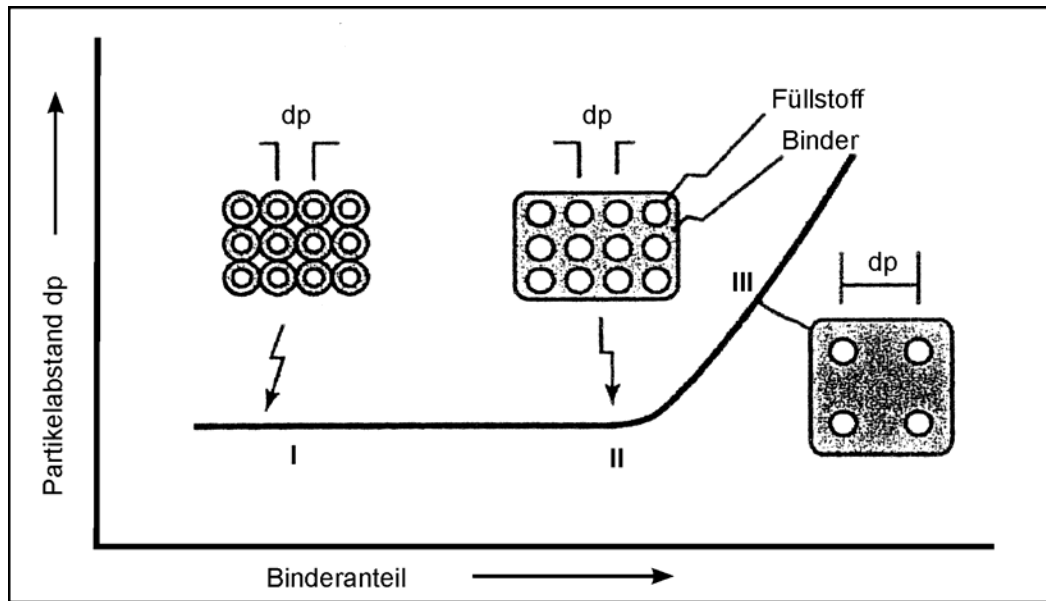


Bild 1-3: Abhängigkeit des Partikelabstandes vom Bindergehalt [GAR74].

Der optimale Füllgrad von LTCC-Folien ergibt sich in Bereich II, da hier bei hoher Festigkeit die Schwindung durch den geringen Partikelabstand minimiert und eine bessere Prozessstabilität erreicht wird.

Beim Trocknen des Schlickers entweicht Lösungsmittel. Dies führt durch die damit verbundene Volumenreduktion des Polymers dazu, dass die Grenzschichtdicke abnimmt, sich die Partikel weiter annähern und Poren zunehmen. Nichtflüchtige Zusätze verbleiben in der Polymermatrix und beeinflussen deren mechanisches Verhalten. Der Feststoffanteil von LTCC-Folien beträgt im getrockneten Zustand bis zu 80%. Zur Beschreibung des Füllstoffeinflusses auf die viskoelastischen Eigenschaften von Festkörpern ist es sinnvoller, statt der relativen Viskosität η_R das Verhältnis der Verlustmoduln (siehe Abschnitt 1.5) zu betrachten. Es wird durch Gleichung 1-2 beschrieben [SHE99, Seite 383]:

$$\frac{G_K''}{G_P''} = \frac{1}{[1 - (\phi B)^{\bar{n}}]} \quad (\text{GL 1-2})$$

Die empirische Gleichung gilt für gefüllte Polymerschmelzen und Festkörperkomposite, G_K'' und G_P'' sind hier die Verlustmoduln des Komposites bzw. der Polymermatrix und Φ der Füllgrad. Der Anstieg \bar{n} der sich aus der logarithmischen Darstellung von $(1 - G_P''/G_K'')$ über Φ ergebenden Geraden wird experimentell ermittelt. B ist ein Geometriefaktor, der die Oberflächeneigenschaften der Grenzschicht zwischen Feststoffpartikel und Matrix beschreibt. Er ist für runde Körper nach Gleichung 1-3 berechenbar:

$$B = \left(1 + \frac{2\Delta R}{D}\right)^3 \quad (\text{GL 1-3})$$

Hierin ist D der Partikeldurchmesser und ΔR entspricht der Dicke der Grenzschicht (s. Bild 1-2). Der Geometriefaktor B verkleinert sich mit steigender Partikelgröße und ist wie der Parameter \bar{n} temperatur- und scherratenabhängig, da diese Prozessgrößen die Dicke der Grenzschicht beeinflussen. Typische Werte für B liegen zwischen 1 und 2. Der Exponent \bar{n} nimmt für Polymerschmelzen kleinere Werte an als für Festkörper. Die empirisch ermittelten mathematischen Beziehungen machen deutlich, dass der Verlustmodul mit zunehmendem Füllgrad steigt. Es folgt daraus, dass die innere Reibung des Verbundwerkstoffes wesentlich durch die physikalische Struktur und die Grenzflächeneigenschaften geprägt wird, welche sich aus Füllgrad, Korngröße und -verteilung des Pulvers sowie Adhäsionskräften zwischen Polymermatrix und Feststoff ergeben [IMA00, Seite 126].

1.3.3 Kraftleitung beim Umformen von LTCC-Grünfolien

Ausgehend von der Spannungsverteilung bei Druckbelastung von Zuschlagstoffen in Baumaterial wie Beton [WIS72] werden hier Überlegungen zur Kraftausbreitung in der Folie bei äußerer Druckbelastung abgeleitet. Die harte Füllstoffphase in der Grünfolie ist eingebunden in eine vergleichsweise weiche Matrix des polymeren Binders. Bei Belastung verformt sich hauptsächlich das Polymer, da zur Deformation der Füllstoffe wesentlich höhere Kräfte nötig sind. Übertragen wird die Belastung an den Berührungspunkten zwischen den Füllstoffpartikeln. Der Kraftfluss im Gefüge ist schematisch in Bild 1-4 veranschaulicht. An jedem Partikel wird an mehreren Stellen je nach Geometrie und Lage eine Kraft eingeleitet und an die nächsten Nachbarn verteilt. An jedem Berührungspunkt wird die Normalkomponente weitergeleitet, die Tangentialkomponente bewirkt bei ausreichender Größe eine Verschiebung der Partikel.

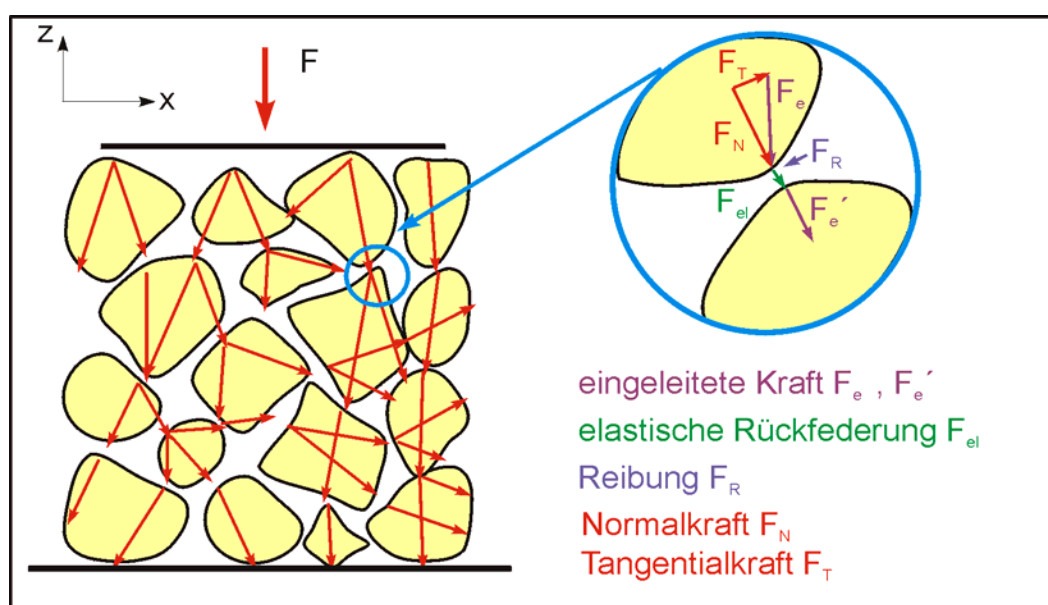


Bild 1-4: Kraftfluss im LTCC-Verbundwerkstoff beim Prägen.

Diese chaotische Kraftübertragung führt zu verschiedenen Belastungszuständen an den Grenzflächen zwischen Füllstoffen und Matrix. Sowohl Druckspannungen, Schubspannungen als auch Zugspannungen können auftreten. Aufgrund ihrer Härte ist die elastische Deformation der Füllstoffe im Vergleich zu der des Binders vernachlässigbar. Hohe Flächenpressungen an den Berührungspunkten können zum Füllstoffbruch führen. Die Kräfte werden durch die elastische Verformung, irreversible Vorgänge in der Binderschicht und die der Relativbewegung entgegen wirkende Reibung abgeschwächt. So vermindert sich die ins nächste Korn eingeleitete Kraftkomponente und führt zu einem Spannungsgradienten im Pressling. Unter Einwirkung des Prägedrucks kommt es zu Verdichtung des Verbundes und damit zur Abnahme der Porosität. Füllstoffpartikel gleiten ab, werden umgeordnet sowie zerkleinert. Bestimmend für den sich bei einer Druckbelastung einstellenden Gleichgewichtszustand sind die Elastizität der Folienbestandteile sowie die Adhäsion zwischen Binder und Partikel bzw. die Kohäsion des Binders, welche makroskopisch als innere Reibung erfasst werden.

1.4 Grundlagen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten beim Umformen

1.4.1 Spannungen

Zur Zustandsbeschreibung bei Umformprozessen werden lokale und globale Größen unterschieden. Lokale Größen benennen die zeit- und ortsabhängigen Zustände der jeweiligen Variablen. Sie werden in der Regel durch aufwendige Versuche oder bei bekanntem Materialverhalten durch numerische Berechnungsverfahren bestimmt. Globale Größen beschreiben die Zustandsänderungen, die innerhalb der einer Umformstufe erreicht werden und können leicht aus den Prozessparametern und Werkstückgeometrien für diesen Umformschritt ermittelt werden.

Beim Stauchen wird eine Kraft einachsig eingeprägt. Schubspannungen, hervorgerufen durch innere Reibung des Werkstoffes, führen zu Dimensionsänderungen in allen drei Körperabmessungen. Der qualitative Spannungsverlauf an einem gestauchten Werkstück ist in Bild 1-5 dargestellt. Der lokale Spannungszustand eines beliebigen Volumenelementes dV wird durch den Spannungstensor σ_{ij} beschrieben:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_Y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_Z \end{bmatrix} \quad (\text{GL 1-4})$$

Die Spannungskomponenten σ_X , σ_Y und σ_Z in den Hauptachsrichtungen heißen dabei Normalspannungen und werden allgemein mit σ_{kk} bezeichnet, die senkrechten Komponenten werden Schubspannungen genannt und mit $\tau_{xy} \dots \tau_{ij}$ bezeichnet. Der Mittel-

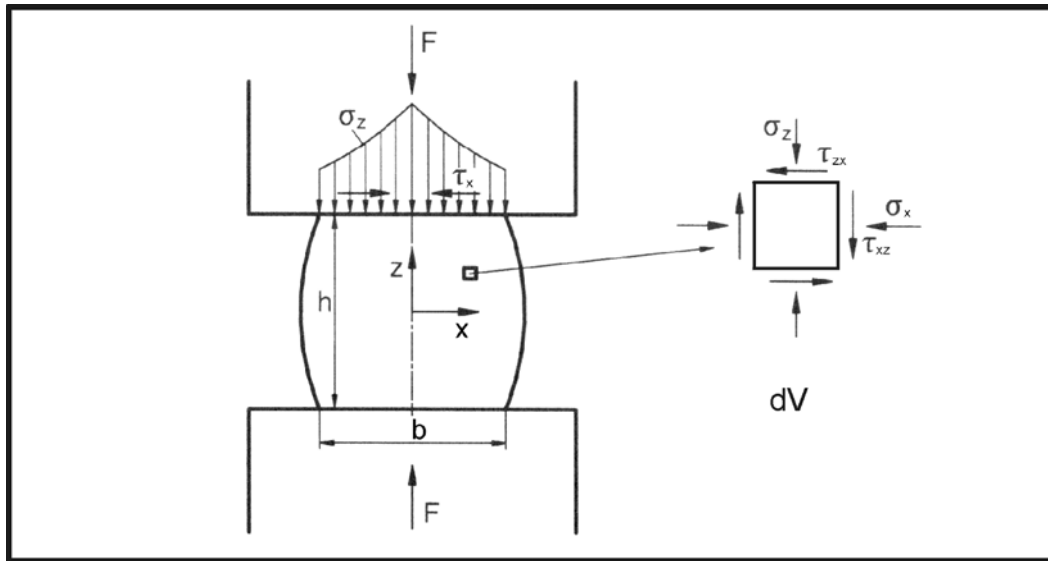


Bild 1-5: Spannungen an einem gestauchten Werkstück [KOP98].

wert aller Normalspannungen heißt hydrostatischer Spannungsanteil σ_m und berechnet sich nach [KOP98, Seite 12] wie folgt:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z) = \frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (\text{GL 1-5})$$

Dieser Anteil bewirkt eine Verdichtung und liefert keinen Beitrag zur gewünschten Formänderung beim Prägen. Subtrahiert man den hydrostatischen Anteil vom Spannungstensor, so erhält man den Spannungsdeviator s_{ij} :

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_Y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\sigma_X - \sigma_m) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_Y - \sigma_m) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_Z - \sigma_m) \end{bmatrix} \quad (\text{GL 1-6})$$

Dieser Anteil bewirkt die Gestaltsänderung des Werkstückes. Die notwendigen Bedingungen für das Fließen werden nun näher betrachtet.

1.4.2 Fließbedingung

Bei äußerer Krafteinwirkung verformt sich ein Festkörper zunächst elastisch. Die im Volumenelement gespeicherte elastische Energie setzt sich aus einem hydrostatischen Verdichtungsanteil w_{VD} und einem Gestaltänderungsanteil w_G zusammen, die nach [DAH93, Seite 78] wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} w_{VD} &= \frac{1-\nu}{6 \cdot E} \sigma_{ij} \sigma_{ij} && \text{hydrostatischer Anteil [N/mm}^2\text{]} && (\text{GL 1-7}) \\ w_G &= \frac{1}{4G} s_{ij} s_{ij} && \text{Gestaltänderungsanteil [N/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

E ist hierbei der E-Modul, G der Schubmodul und ν die Querkontraktionszahl des Materials, σ_{ij} der Spannungstensor und s_{ij} der Spannungsdeviator. Überschreitet die Spannung die Bindungskräfte, so bewirkt der hydrostatische Spannungsanteil σ_m , berechnet gemäß Gleichung 1-5, eine Volumenkompression, während der Gestaltänderungsanteil, beschrieben durch den Spannungsdeviator s_{ij} in Gleichung 1-6, eine plastische Verformung hervorruft. Beide Vorgänge laufen gleichzeitig ab. Das elastische Materialverhalten ist somit für die Verteilung der zur plastischen Verformung und der zur Verdichtung wirksamen Spannungsanteile verantwortlich. Die Belastung, bei der diese irreversiblen Vorgänge beginnen, ist durch die Bindungskräfte des Materials, makroskopisch verkörpert durch dessen Fließgrenze, gegeben. Die Spannung, bei der irreversible Vorgänge im einachsigen Belastungsfall einsetzen wird als Fließspannung k_f bezeichnet. Ihr Betrag ist sowohl von Material und Materialzustand als auch von der Belastungsart abhängig. Sie ist damit eine Systemgröße und muss spezifisch für die jeweilige Umformsituation bestimmt werden.

Zur Beschreibung der Fließbedingung inkompressibler Festkörper existieren zwei Modelle. Nach der Schubspannungshypothese gemäß TRESKA tritt Fließen ein, wenn die größte Hauptnormalspannungsdifferenz als Vergleichsspannung den Wert der Fließspannung erreicht [KOP98, Seite 99]:

$$\sigma_V \text{ TRESKA} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = k_f \quad (\text{GL 1-8})$$

Nach der Gestaltänderungsarbeitshypothese gemäß VON MISES tritt Fließen ein, wenn eine nach einer geeigneten Hypothese gebildete Vergleichsspannung σ_V die Fließspannung überschreitet [KOP98, Seite 100]. In kartesischen Koordinaten gilt:

$$\sigma_V \text{ MISES} \quad (\text{GL 1-9})$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + (\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_X)^2 + 3(\tau_{XY}^2 + \tau_{YZ}^2 + \tau_{ZX}^2)]}$$

$$= k_f$$

Beide Vergleichsspannungen unterscheiden sich nur geringfügig, für die Abweichung gilt entsprechend [KOP98, Seite 100]:

$$1,15 \times \sigma_V \text{ MISES} \approx \sigma_V \text{ TRESKA} \quad (\text{GL 1-10})$$

Der Fließort im Spannungsraum mit den Hauptspannungen σ_X , σ_Y bzw. σ_Z als Koordinaten ist nach TRESKA durch einen Sechseck-Zylinder und nach VON MISES durch einen Kreiszylinder gegeben, dessen Radius der Fließspannung k_f entspricht, wobei jeder Spannungsort auf dem Zylindermantel die Fließbedingung erfüllt. Die Lage der Zylinderachse im Raum beschreibt den hydrostatischen Spannungsanteil in Gleichung 1-7, vgl. dazu [KOP98, Seite 104]. Bei inkompressiblen Festkörpern hat die Lage die-

ses Fließzylinders keinen Einfluss auf das Fließverhalten, der hydrostatische Spannungsanteil bewirkt lediglich eine elastische Deformation des betrachteten Volumenelementes. Im Gegensatz dazu muss bei LTCC-Grünfolien der Einfluss der Verdichtung betrachtet werden. Sie bewirkt eine Erhöhung der Fließspannung, gekennzeichnet dadurch, dass sich je nach Lage im Spannungsraum der Radius des Fließzylinders ändert. Um das Umformverhalten quantitativ zu beschreiben, müssen daher sowohl das elastische und das plastische Werkstoffverhalten als auch das Verdichtungsverhalten unter den jeweiligen Prozessbedingungen bekannt sein.

1.4.3 Technische Dehnung

Formänderungen werden durch lokale und globale Größen beschrieben. Eine Visualisierung lokaler Dehnungen ist durch Aufbringen eines Messrasters auf das Werkstück und dessen Auswertung nach dem Umformen möglich (s. Abschnitt 4.2), die globalen Größen werden durch Vermessung des Werkstückes nach der jeweiligen Umformstufe bestimmt.

Bild 1-6 illustriert die Geometrieänderungen an einem gestauchten Körper in der Ebene. Die technischen Dehnungen in den Körperhauptkoordinaten ergeben sich aus den Maßen vor und nach dem Stauchen und werden auch bezogene Abmessungsänderungen genannt. Sie sind als die auf die Ausgangsmaße der Umformstufe bezogene Abmessungsänderung definiert. In dieser Arbeit werden die globalen Dehnungen ε_k mit den Körperabmessungssymbolen b , l und h indiziert:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{b_0} \cdot 100\% \quad \varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100\% \quad \varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \cdot 100\% \quad (\text{GL 1-11})$$

Die lokalen Größen ε_i tragen den Index x , y bzw. z . Die an einem beliebigen Volumenelement dV auftretenden Dehnungen betragen:

$$\varepsilon_x = \frac{dl}{l} \quad \varepsilon_y = \frac{db}{b} \quad \varepsilon_z = \frac{dh}{h} \quad (\text{GL 1-12})$$

Die technische Dehnung ist zur Beschreibung der Geometrieänderungen in der Praxis sehr gebräuchlich. Sie ist jedoch nicht skalierbar, dass heißt die Summe der resultierenden Gesamtformänderung entspricht nicht der Summe der Einzelformänderungen. Um eine leichtere Handhabung zu ermöglichen, wird daher die logarithmische Dehnung, der sogenannte Umformgrad, zur Beschreibung der Formänderung benutzt.

1.4.4 Umformgrad (logarithmische Dehnung)

Der Umformgrad φ_i ist definiert als die gemittelte lokale Gesamtformänderung $\overline{\varepsilon}_i$ über die jeweilige Körperabmessung. Es gilt beispielsweise in x -Richtung:

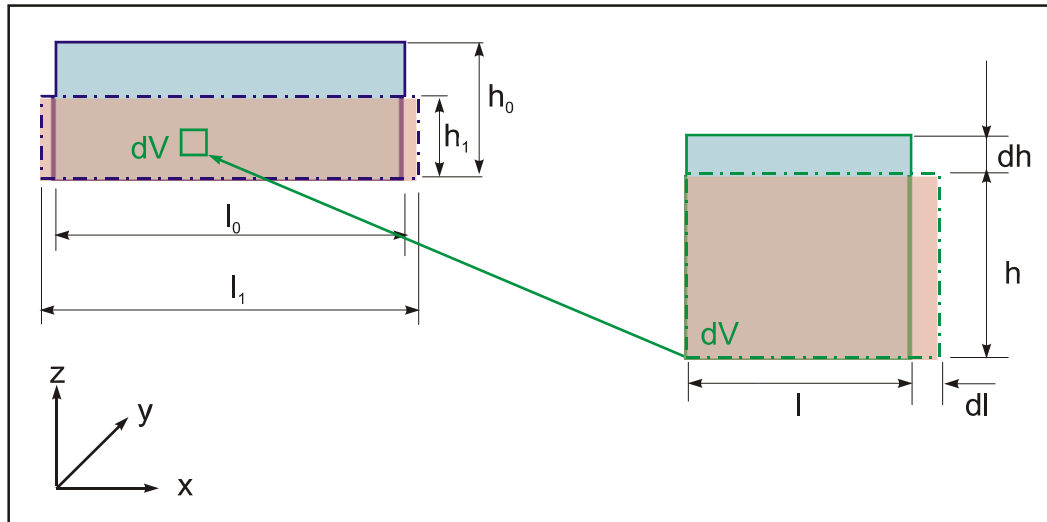


Bild 1-6: Abmessungsänderungen an einem gestauchten Körper, die Körperabmessungen in y-Richtung werden analog mit b bezeichnet.

$$\varphi_X = \overline{\varepsilon_X} = \frac{1}{X_0} \int_0^{X_0} \varepsilon_X dx \quad (\text{GL 1-13})$$

Die globalen Umformgrade φ_k werden analog zur Dehnung mit l , b und h für Länge, Breite und Höhe indiziert. Aus den Körperabmessungen ergeben sich bei homogener Formänderung die Beziehungen [KOP98, Seite 20]:

$$\varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \varphi_b = \ln \frac{b_1}{b_0} \quad \varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (\text{GL 1-14})$$

Technische Dehnung und Umformgrad können mit folgender Gleichung ineinander umgerechnet werden.

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \ln(1 + \varepsilon_i) \\ \varepsilon_i &= e^{\varphi_i} - 1 \end{aligned} \quad (\text{GL 1-15})$$

Diese Beziehung gilt analog für die globalen Größen φ_k und ε_k [KOP98, Seite 23].

1.4.5 Arbeit

Der am Volumenelement dV während des Umformens in einer Hauptachsrichtung geleistete Arbeitszuwachs dW_i wird durch Integration des Spannungs-Dehnungs-Produktes über das Gesamtvolumen bestimmt [KOP98, Seite 35]:

$$dW_i = \int_{(V)} \sigma_i d\varepsilon_i dV \quad (\text{GL 1-16})$$

Bei homogener Formänderung, Spannung und Verdichtung vereinfacht sich die Beziehung [KOP98, Seite 36] und wird zu:

$$dW_i = V \sigma_i d\varphi_i \quad (\text{GL 1-17})$$

$$W = V \cdot \int \sigma_i d\varphi_i$$

Die lokale, am Volumenelement verrichtete Arbeit wird durch Summation der partiellen Komponenten in den jeweiligen Spannungsrichtungen gebildet und ist nur mit numerischen Berechnungen ermittelbar. Bezieht man die verrichtete Arbeit auf das betrachtete Volumenelement, erhält man die spezifische Formänderungsarbeitsdichte w . Sie ist als die auf das Werkstückvolumen V bezogene Formänderungsarbeit definiert. Die globale spezifische Formänderungsarbeitsdichte wird für die jeweilige Umformsituation experimentell aus Spannungs-Dehnungs-Kennlinien bestimmt und beträgt bei homogener Formänderung:

$$w = \int \sigma_i d\varphi_i \quad (\text{GL 1-18})$$

Diese Systemgröße ist eine Funktion des Materials, der Geometrie sowie der tribologischen Bedingungen, sie dient als Richtwert zur Abschätzung des Kraftbedarfes für den jeweiligen Umformprozess.

1.4.6 Besonderheiten verdichtbarer Materialien

Definition Verdichtung, Verdichtungsgrößen

Unter Verdichtung versteht man die Verringerung des Hohlraumanteils eines porösen Körpers, der ein Anfangsvolumen V_0 und eine Anfangsdichte ρ_0 aufweist. Der Feststoffanteil des Verbundwerkstoffes hat die Dichte ρ_F , die scheinbare Dichte des Verbundwerkstoffes ρ_S beschreibt das Masse-Volumen-Verhältnis unter den jeweiligen äußeren Bedingungen. Der Hohlraumanteil wird Porosität P genannt und kann bei bekannten Dichten berechnet werden:

$$P = 1 - \frac{\rho_S}{\rho_F} \cdot 100 [\%] \quad (\text{GL 1-19})$$

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Druck und Porosität bzw. Verdichtung existieren verschiedene, meist empirische Ansätze [GRO06, Seite 18].

Die einfachste, lineare Betrachtung des globalen Zustands erfolgt durch die Kompressibilität k , welche die Verdichtung als Verhältnis der resultierenden Volumenänderung ΔV zum Ausgangsvolumen V_0 bei einer gegebenen Druckänderung Δp ausdrückt. Die Definitionsgleichung lautet:

$$k = \left| \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta p} \right| \quad (\text{GL 1-20})$$

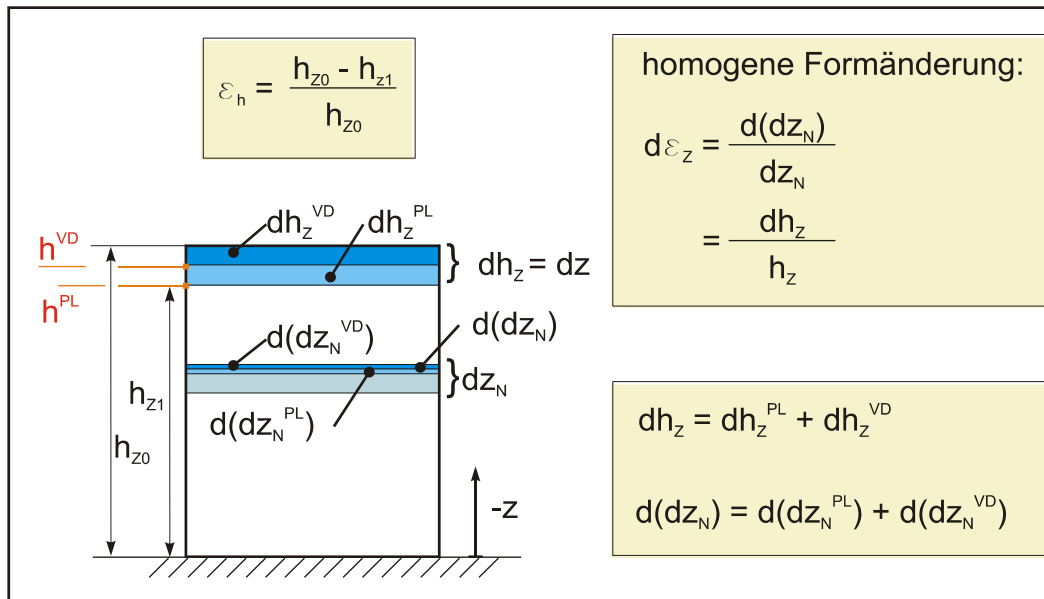


Bild 1-7: Formänderungen verdichtbarer Körper bei Druckbelastung.

Analog zur Dehnung kann auch die Verdichtung logarithmisch durch den Verdichtungsgrad φ^{VD} beschrieben werden:

$$\varphi^{VD} = \ln \frac{\Delta V}{V_0} \quad (\text{GL 1-21})$$

Wie bereits in Abschnitt 1.4.4 erläutert wurde, hat diese Darstellungsweise gegenüber der linearen Betrachtung den Vorteil der Skalierbarkeit.

Formänderung verdichtbarer Festkörper

Für inkompressible Festkörper sind die Zusammenhänge zwischen Krafteinwirkung und Formänderung bereits umfangreich in der Literatur beschrieben [KOP98, DAH93]. Äquivalente Quellen wurden für verdichtbare Materialien nicht gefunden. Daher wird hier die Berechnung der Formänderung für den eindimensionalen Fall auf verdichtbare Festkörper erweitert.

Die aus der Belastung mit einer Druckspannung σ_Z resultierenden Formänderungen sind in Bild 1-7 für den einachsigen Betrachtungsfall dargestellt. Die eingeprägte Spannung bewirkt eine Reduktion der Werkstückhöhe von h_{z0} auf h_{z1} . Aus ihrer Differenz, bezogen auf die Ausgangshöhe, wird für diesen definierten Umformprozess die globale Formänderung ε_h nach Gleichung 1-11 errechnet. Diese entspricht der in den jeweiligen Werkstückstreifen dz vorliegenden lokale Formänderungen $d\varepsilon_z$, integriert über die Gesamthöhe (s. Bild 1-7). Sowohl die globale Formänderung ε_h als auch die lokale $d\varepsilon_z$ kann in einen plastischen Anteil ε^{PL} und einen Verdichtungsanteil ε^{VD} unterteilt werden. An einer beliebigen Stelle ist die Dehnung $d\varepsilon_z$ durch den Dimensionszuwachs $d(dz_N)$ bezogen auf die ursprüngliche Dimension des betrachteten Ele-

menten dz_N gegeben. Nimmt man vereinfachend sowohl Formänderung als auch Verdichtung als homogen an, so ergibt sich mit den Beziehungen in Bild 1-7 unter Annahme homogener Formänderung und Verdichtung, d.h. $\varepsilon^{VD}(z)=\text{konstant}$ und $\varepsilon^{PL}(z)=\text{konstant}$:

$$d\varepsilon_Z = d\varepsilon^{PL} + d\varepsilon^{VD} = \frac{d(dz^{PL})}{dz} + \frac{d(dz^{VD})}{dz} = \frac{dh_Z}{h_{Z0}} = \frac{dh_Z^{PL}}{h_{Z0}} + \frac{dh_Z^{VD}}{h_{Z0}} \quad (\text{GL 1-22})$$

Die Formänderung ε_Z kann nach Einsetzen in Gleichung 1-13 durch den Umformgrad ausgedrückt werden. Analog zur Dehnung lässt sich auch der Umformgrad als gemittelte lokale Gesamtformänderung in einen plastischen und einen Verdichtungsanteil aufteilen. Unter Nutzung der Beziehung aus Gleichung 1-12 kann dz durch $d\varepsilon_Z$ ersetzt werden und es folgt:

$$\begin{aligned} \varphi_Z &= \overline{\varepsilon_Z} = \frac{1}{h_{Z0}} \int_0^{h_{Z0}} \varepsilon_Z dz \\ &= \int_{h_{Z0}}^{h^{VD}} \frac{dh_Z^{VD}}{h_Z} + \int_{h^{VD}}^{h^{PL}} \frac{dh_Z^{PL}}{h_Z} \end{aligned} \quad (\text{GL 1-23})$$

Beide Integrale ergeben eine logarithmische Funktion für den jeweiligen Verdichtungsgrad φ_Z^{VD} und Umformgrad φ_Z^{PL} :

$$\varphi_h = \varphi_Z = \varphi_Z^{VD} + \varphi_Z^{PL} = \ln \frac{h^{VD}}{h_{Z0}} + \ln \frac{h^{PL}}{h^{VD}} \quad \text{mit} \quad h^{PL} = h_{Z1} \quad (\text{GL 1-24})$$

Wie bereits bei Definition der Umformgrade erwähnt, ist der Vorteil dieser Darstellungsweise, dass die Umformgrade additiv miteinander verknüpft werden können. Im Einzelnen gilt:

$$l_1 \cdot b_1 \cdot h_1 = l_0 \cdot b_0 \cdot h_0 + \Delta l \cdot \Delta b \cdot \Delta h \quad (\text{GL 1-25})$$

$$\frac{l_1 \cdot b_1 \cdot h_1}{l_0 \cdot b_0 \cdot h_0} = \frac{\Delta l \cdot \Delta b \cdot \Delta h}{l_0 \cdot b_0 \cdot h_0}$$

$$\ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{h_1}{h_0} = \ln \frac{\Delta V}{V_0}$$

Es wird angenommen, dass die Volumenkompression beim Stauchen ausschließlich in z-Richtung erfolgt, da das Material in x- und y-Richtung ausweichen kann und sich somit keine hydrostatische Spannungskomponente aufbaut. Weiterhin kompensieren sich die Anteile der plastische Verformung in den Hauptspannungsrichtungen. Daraus folgt für die Formänderung:

$$\varphi_1^{PL} + \varphi_b^{PL} + \varphi_h^{PL} + \varphi_h^{VD} = \ln \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{GL 1-26})$$

Der Term auf der rechten Seite wurde in Gleichung 1-21 als Verdichtungsgrad φ^{VD} definiert. Er entspricht somit der vorzeichenbehafteten Summe der Formänderungen. Für die plastische Formänderung gilt:

$$\varphi^{PL} = \varphi_1^{PL} + \varphi_b^{PL} + \varphi_h^{PL} = 0 \quad (\text{GL 1-27})$$

Die vorzeichenbehaftete Summe aller plastischen Formänderungen des verdichtbaren Körpers ist nach Abzug des Verdichtungsanteils gleich Null. An diesem Beispiel wird der Vorteil der Verwendung der logarithmischen Dehnung deutlich. Die Beziehungen zwischen den technischen Dehnungen sind schwerer zu handhaben, unter Verwendung von Gleichung 1-15 können die Größen jedoch ineinander umgerechnet werden.

Energetische Betrachtungen

Die an der Presse umgesetzte Staucharbeit W_{St} kann experimentell im Stauchversuch ermittelt werden. Sie ergibt sich für das Werkstoffvolumen V_0 als Integral des gemessenen Umformgrades über die Spannung σ_Z nach Gleichung 1-17

$$W_{St} = V_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sigma_Z d\varphi_Z \quad (\text{GL 1-28})$$

und kann zunächst formal durch die Summe verschiedener Komponenten dargestellt werden:

$$W_{St} = W_{EL} + W_R + W_{PL} + W_{VD} \quad (\text{GL 1-29})$$

Dabei bezeichnet W_R die Reibungsarbeit an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, W_{EL} die elastische Arbeit, W_{PL} die Umformarbeit und W_{VD} die Verdichtungsarbeit. Umform- und Verdichtungsarbeit werden auch zur Deformationsarbeit W_D zusammengefasst.

Der Reibungsanteil wird an der Grenzfläche A zwischen Werkstück und Werkzeug in Wärme umgesetzt. Die Größe der Reibschubspannung τ_R hängt vom Oberflächenzustand ab. Sie wirkt der Relativbewegung der beiden Reibpartner, gekennzeichnet durch die Verschiebung s_{rel} an der Grenzfläche, entgegen. Sind Reibschubspannung und die Relativgeschwindigkeit der Reibpartner zeitunabhängig, so ergibt sich der Reibanteil nach Gleichung 1-30 [KOP98, Seite 120]:

$$W_R = \int_{(A)} \tau_R s_{rel} dA \quad (\text{GL 1-30})$$

Die übrige Arbeit wird in das System übertragen und unterteilt sich in elastische Formänderungsarbeit und Deformationsarbeit. Unter Annahme homogener Verdichtung und Formänderung kann vereinfachend die spezifische Formänderungsarbeitsdichte w betrachtet werden. Ihr elastischer Anteil, die spezifische elastische Formänderungsarbeit w_{EL} ist die Summe der in Gleichung 1-7 angegebenen Gestaltänderungsarbeit und der elastischen Kompression, gegeben durch die auf das Volumen bezogene Formänderungsarbeit. Die spezifische Deformationsarbeit w_D errechnet sich nach Gleichung 1-18. Ihr plastischer Anteil, die spezifische Umformarbeit w_{PL} berechnet sich unter Nutzung des Umformgrades φ^{PL} und der Verdichtungsanteil, die spezifische Verdichtungsarbeit w_{VD} unter Verwendung des Verdichtungsgrades φ^{VD} . Durch Einsetzen von Gleichung 1-24 in Gleichung 1-18 erhält man folgende Gleichung zur Berechnung der spezifischen Deformationsarbeit für das Bezugsvolumen:

$$w_D = w_{VD} + w_{PL} = \int \sigma_i d\varphi_i^{VD} + \int \sigma_i d\varphi_i^{PL} \quad (GL 1-31)$$

Bei Anwendung der Fließbedingung entspricht die Spannung σ_i der Fließspannung k_f , da für Spannungszustände mit $\sigma_i < k_f$ nur elastische Verformungen auftreten. Spannungszustände mit $\sigma_i > k_f$ sind nicht möglich, da in diesem Fall das Festkörpergefüge nachgeben würde. Damit folgt für die Deformationsarbeit:

$$w_D = w_{VD} + w_{PL} = \int k_f d\varphi_i^{VD} + \int k_f d\varphi_i^{PL} \quad (GL 1-32)$$

Wie bereits oben erwähnt, ist die Fließspannung eine Funktion der Umformbedingungen und des Materialzustandes.

Vereinfachend wird eine Systemgröße definiert, die neben dem Werkstoffeinfluss auch die Verluste zusammenfasst. Diese wird Umformwiderstand k_w genannt und ist für Verfahren mit direkter Druckwirkung als Kraft F , bezogen auf die Projektionsfläche A_d senkrecht zur Kraftrichtung definiert [KOP98, Seite 125]:

$$k_w = \frac{F}{A_d} \quad (GL 1-33)$$

Der Umformwiderstand ist als Betrag der mittleren Normaldruckspannung in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug zu verstehen. Es handelt sich um eine momentane, zeitabhängige Größe, die wie die Fließspannung eine Funktion der Verdichtung ist. Für das Stauchen unter einem Quader mit $l=b=a$ kann folgende vereinfachte Beziehung für den Umformwiderstand k_w angegeben werden [KOP98, Seite 152]:

$$k_w = |\sigma_{zm}| = k_f \left(1 + \frac{\mu \cdot a}{3 \cdot h} \right) \quad (GL 1-34)$$

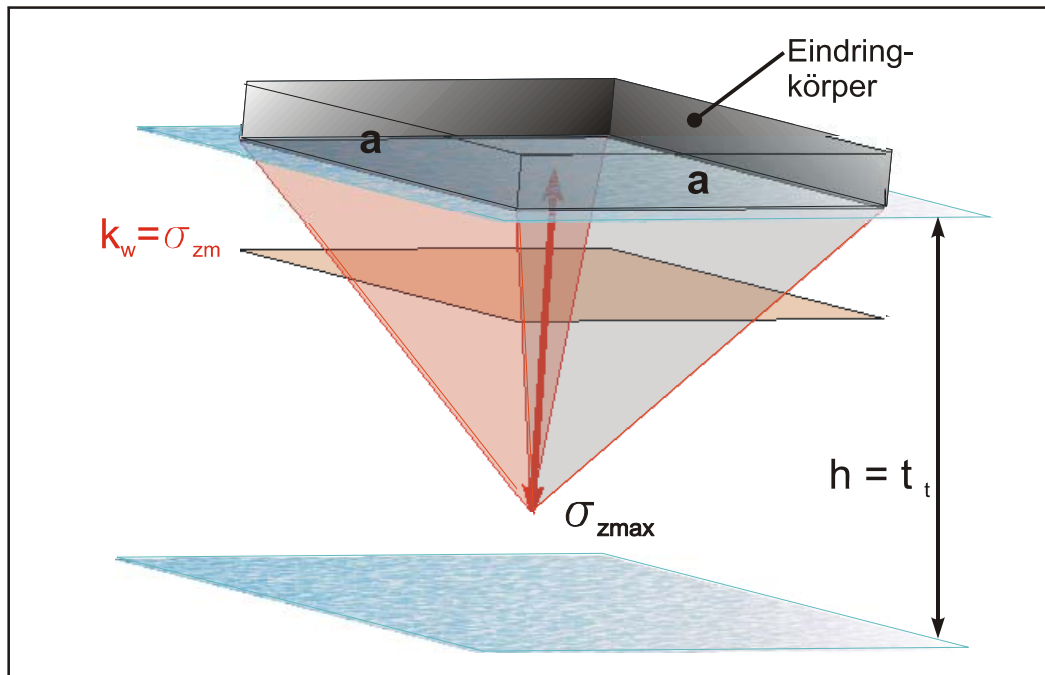


Bild 1-8: Umformwiderstand beim Stauchen eines Folienstapels der Dicke t_t mit einem quaderförmigen Eindringkörper der Kantenlänge a .

Darin ist σ_{zm} die gemittelte Spannung in Stauchrichtung, μ der Reibkoeffizient der Materialpaarung, a die Kantenlänge des Quaders und h die Höhe der Anordnung. Bild 1-8 veranschaulicht den Umformwiderstand beim Stauchen eines Folienstapels mit der Dicke t_t durch einen quadratischen Eindringkörper mit der Kantenlänge a . Der Rauminhalt der über der Bezugsfläche aufgespannten Pyramide mit der Scheitelhöhe σ_z ist gleich dem Rauminhalt des Quaders mit identischer Grundfläche und der Höhe k_w .

Unter Verwendung des Umformwiderstandes kann die spezifische Umformarbeit für einen Prozess nun nach Gleichung 1-31 folgendermaßen angegeben werden:

$$w_{PL} = \int k_w d\phi^{PL} \quad (GL\ 1-35)$$

und die spezifische Verdichtungsarbeit ist gleich:

$$w_{VD} = \int k_w d\phi^{VD} \quad (GL\ 1-36)$$

Die Summe aus beiden Anteilen bestimmt den zur Umformung erforderlichen Kraftbedarf pro Fläche. Der Geometrieinfluss auf das Dehnungsverhalten wird durch den Umformwiderstand berücksichtigt.

1.4.7 Schwindung

Der Verdichtungsprozess beim Sintern ist ein komplexer Vorgang. Die Enddicke des Verbundmaterials stellt sich in Abhängigkeit von der Prozessführung ein [GAU01, Seite 233]. Die mit der Sinterung einhergehende Abmessungsänderung bezeichnet man

als Schrumpf oder Schwindung. Die resultierenden Dimensionsänderungen sind neben der Prozessführung abhängig vom Verdichtungszustand und der Dichteverteilung des Grünkörpers. Ihre Beschreibung erfolgt analog zur technischen Dehnung. Die Längenänderungen ΔX , ΔY bzw. ΔZ in der jeweiligen Raumrichtung werden auf die Dimensionen des verdichteten Grünkörpers X_d , Y_d und Z_d vor dem Sintern bezogen. Die globalen Schwindungskomponenten s_k in den drei Hauptrichtungen betragen:

$$\text{x-Richtung : } s_x = \left| \frac{\Delta X}{X_d} \right| \quad (\text{GL 1-37})$$

$$\text{y-Richtung : } s_y = \left| \frac{\Delta Y}{Y_d} \right|$$

$$\text{z-Richtung : } s_z = \left| \frac{\Delta Z}{Z_d} \right|$$

Obwohl die Abmessungen sich verkleinern, wird die Schwindung in der Regel positiv angegeben. Dies wird durch Bildung des Betrages gesichert. Die Volumenschwindung ist die auf das verdichtete Grünvolumen V_d des Körpers bezogene Volumenabnahme ΔV beim Brennprozess:

$$s_V = \left| \frac{\Delta V}{V_d} \right| \quad (\text{GL 1-38})$$

Analog werden die Dimensionsänderungen u_x , u_y bzw. u_z vom unverdichteten Zustand, d.h. vor Druckanwendung bei Lamination oder Prägen, zum gebrannten Zustand definiert. X_0 , Y_0 und Z_0 stehen dabei für die Abmessungen im unverdichteten Zustand:

$$\text{x-Richtung : } u_x = \left| \frac{\Delta X}{X_0} \right| \quad (\text{GL 1-39})$$

$$\text{y-Richtung : } u_y = \left| \frac{\Delta Y}{Y_0} \right|$$

$$\text{z-Richtung : } u_z = \left| \frac{\Delta Z}{Z_0} \right|$$

Die Größen ΔX , ΔY und ΔZ bezeichnen die Längenänderungen vom unverdichteten Grünkörper zur gebrannten Keramik. Für das Volumen gilt:

$$u_V = \left| \frac{\Delta V}{V_0} \right| \quad (\text{GL 1-40})$$

Dabei bezieht sich die Volumenänderung u_V auch hier auf den gesamten Prozess. Die Betragsdarstellung bewirkt ein positives Vorzeichen auch bei Volumenverkleinerung. Schwindungswerte werden wie technische Dehnungen oft in Prozent angegeben.

1.5 Beschreibung viskoelastischer Eigenschaften von LTCC-Folien

1.5.1 Kriechverhalten

Die Rheologie ist für die keramische Verfahrenstechnik von großer Bedeutung, denn sie beschreibt das zeitabhängige Deformations- und Fließverhalten von Stoffen bei der Einwirkung äußerer Kräfte und ermöglicht so das Verständnis der Formgebung flüssiger oder plastischer keramischer Massen. Das Deformations-Zeit-Verhalten keramischer Suspensionen und polymerer Werkstoffe wird durch das BURGERS-Modell beschrieben, welches aus einer Reihenanzordnung eines viskoelastischen Fluids mit einem viskoelastischen Festkörper, auch KELVIN-VOIGT-Festkörper genannt, besteht. Bild 1-9 zeigt das mechanische Ersatzschaltbild. Die durch eine äußere Kraft hervorgerufene Deformation γ setzt sich aus einem zeitunabhängigen, elastischen Anteil γ_3 , beschrieben durch das HOOKESCHE Gesetz mit dem Schubmodul G_H , einen zeitabhängigen, elastischen Teil γ_1 , beschrieben durch Elastizität G_{KV} und Viskosität η_{KV} des KELVIN-VOIGT-Festkörpers sowie dem irreversiblen Anteil γ_2 , gekennzeichnet durch die NEWTONSCHE Viskosität η_N , zusammen. Die Deformations-Zeit-Funktion lässt sich aus der Bewegungs-Differentialgleichung herleiten. Die Sprungantwort auf die Erregung mit einer Schubspannung τ_0 ist durch Gleichung 1-41 gegeben.

$$\gamma(t) = \gamma_1(t) + \gamma_2(t) + \gamma_3$$

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0}{G_{KV}} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) + \frac{\tau_0 \times t}{\eta_N} + \frac{\tau_0}{G_H} \quad (\text{GL 1-41})$$

Der HOOKESCHE Anteil entspricht der zeitunabhängigen, elastischen Deformation von Binder und Feststoffpartikeln. Die reversible zeitabhängige Deformation ist auf die viskoelastischen Eigenschaften des Binders zurückzuführen. Die KELVIN-VOIGT-Vis-

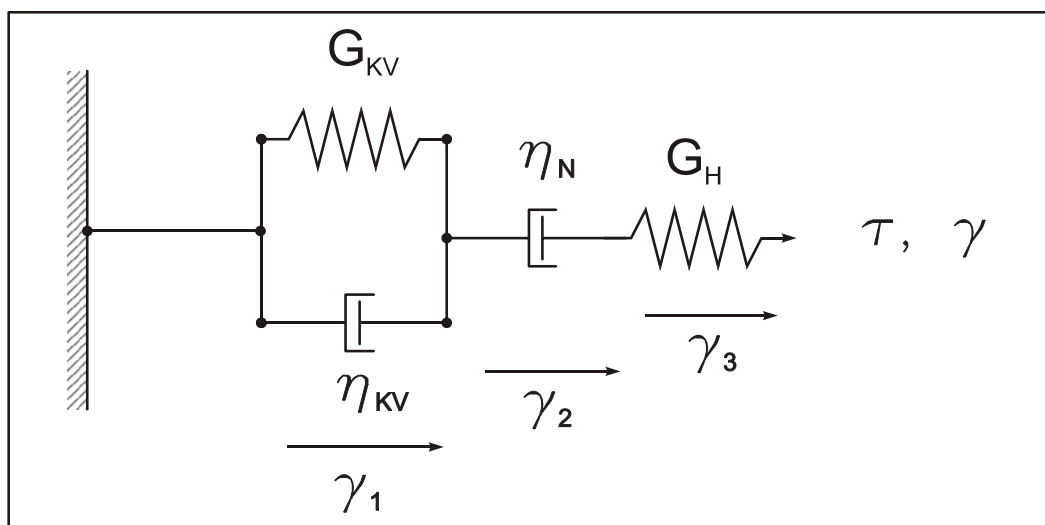


Bild 1-9: Mechanisches Ersatzschaltbild eines BURGERS-Körpers.

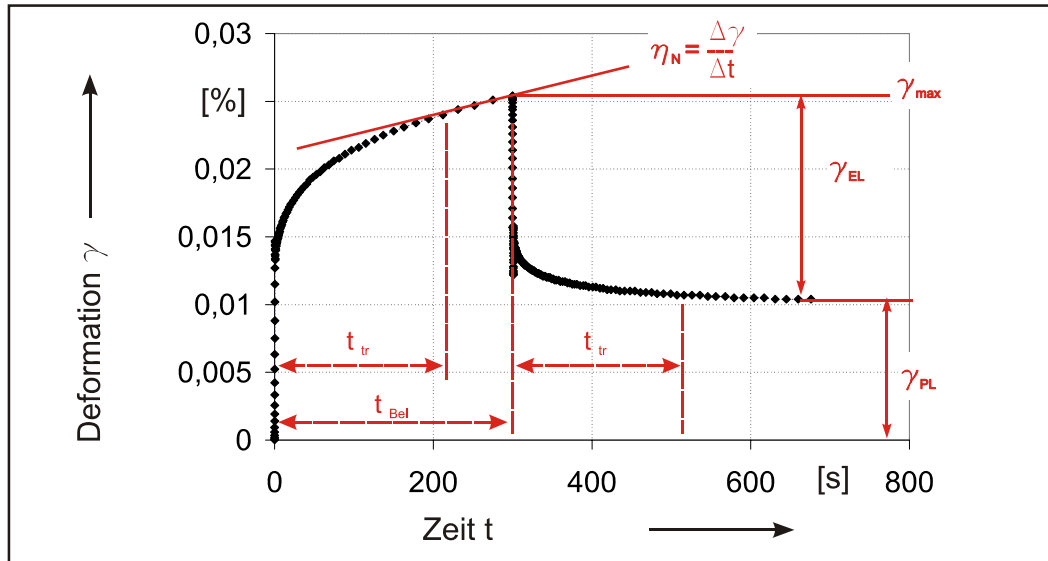


Bild 1-10: Ermittlung von Kenngrößen aus dem Kriechversuch.

kosität η_{KV} bestimmt mit dem Schubmodul G_{KV} die Zeitkonstante λ der Exponentialfunktion in Gleichung 1-41 und repräsentiert das Relaxationsverhalten des Binders. Der NEWTONSCHE Dämpfer beschreibt den linearen Fließanteil und prägt das Deformationsverhalten nach Abklingen der transienten Vorgänge. Seine Viskosität η_N ist ein Maß für die plastische Verformbarkeit des Materials. Ihre Größe wird vor allem durch den Feststoffanteil, die Bindungskräfte und die Verdichtung beeinflusst.

Erfolgt nach einer definierten Zeit bei der erreichten Deformation γ_{\max} eine springhafte Entlastung, kann die resultierende Deformation nach Gleichung 1-42 beschrieben werden.

$$\gamma(t) = \gamma_{\max} - \gamma_1 - \gamma_2(t)$$

$$\gamma(t) = \gamma_{\max} - \frac{\tau_0}{G_H} - \frac{\tau_0}{G_{KV}} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) \quad (\text{GL 1-42})$$

Bild 1-10 zeigt eine typische Messkurve des Kriech-Relaxations-Versuchs. In der Belastungsphase erfolgt zunächst eine elastische Deformation. Sind die transienten Vorgänge nach der Abklingzeit t_{tr} beendet, prägt die NEWTONSCHE Viskosität η_N das Deformationsverhalten. Sie entspricht dem Anstieg der Geraden. Nach Verstreichen der Belastungszeit t_{Bel} wird eine Deformation γ_{\max} erreicht. Sie entspricht der Summe der Einzelanteile $\gamma_1 - \gamma_3$ in Gleichung 1-41. Bei Entlastung findet zunächst wieder eine elastische Rückdeformation um den Betrag γ_3 statt. Nach der Abklingzeit t_{tr} resultiert die plastische Dehnung γ_{PL} , die elastische Deformation γ_{EL} ist die Summe der reversiblen Deformationsanteile $\gamma_1 + \gamma_3$. Durch Kriechversuche können so die Relaxationszeiten und die elastischen und plastischen Anteile der Deformation bestimmt werden.

1.5.2 Komplexe Darstellungsweise

Transformiert man die Gleichungen 1-41 und 1-42 in den Frequenzbereich, so erhält man die komplexe Form der Deformationsgleichung:

$$\gamma(t) = \frac{\tau(t)}{G^*(\omega)} \quad (\text{GL 1-43})$$

Dabei ist G^* die komplexe Form des Schermoduls, bestehend aus dem Speichermodul G' und dem Verlustmodul G'' [BAR89, Seite 46]:

$$G^*(\omega) = G' + j\omega G'' \quad (\text{GL 1-44})$$

Der Speichermodul G' fasst die elastischen Deformationsanteile zusammen, im BURGERS-Modell repräsentiert durch die Schubmoduln G_{KV} und G_H . Der Verlustmodul G'' fasst die plastischen Anteile und Wärmeverluste zusammen. Er verkörpert die Resultierende der beiden Viskositäten η_{KV} und η_N , welche eine zeitverzögerte Antwort auf eine eingeprägte Schubspannung bewirken. Werden die Bindungskräfte durch die Belastung nicht überschritten, findet rein elastische Verformung statt und G'' repräsentiert die innere Reibung des Stoffes unter den jeweiligen Bedingungen. Der Schubspannungsbereich, in dem keine irreversiblen Prozesse stattfinden wird linear viskoelastischer Bereich genannt und mit LVE abgekürzt.

Die komplexe Darstellung kann je nach rheologischem Modell in die entsprechende Zeitfunktion rücktransformiert werden [EWO07].

1.5.3 Variation der Belastung

Die komplexen Parameter werden in Oszillationsmessungen bestimmt. Dazu wird eine harmonische Funktion eingepreßt und die zeitabhängige Reaktion des Materials erfasst. Im Amplitudenversuch wird die Schubspannung allmählich erhöht und die Deformation gemessen. Bild 1-11 zeigt eine typische Messkurve, die den Verlauf der viskoelastischen Moduln als Funktion der Schubspannungsamplitude darstellt. Der LVE-Bereich ist gekennzeichnet durch elastische, reversible Verformungen, die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie verläuft linear, die viskoelastischen Moduln sind konstant. Die LVE-Grenzspannung τ_{LVE} ist als die Schubspannung definiert, bei welcher G' einen Toleranzbereich von 5%, bezogen auf den Plateauwert von G' , verlässt [MEZ00, Seite 41f]. Wird sie überschritten, versagen nach und nach die Bindungskräfte. Dieses Nachgeben der Materialstruktur äußert sich in einem allmählichen Absinken des Speichermoduls G' . Betrachtet man die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie, so ändert sich die Steigung. Dieser Bereich wird als Fließzone bezeichnet. Anschließend stellt sich wieder ein linearer Verlauf beider Moduln ein. Approximiert man die abknickende Kennlinie durch eine Gerade, so ergibt sich die Fließspannung τ_F als Schnittpunkt dieser

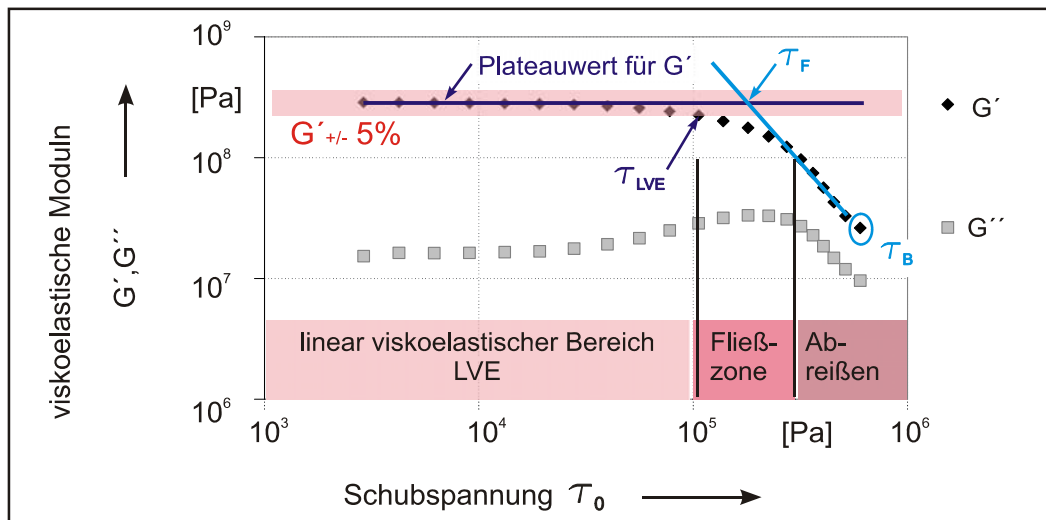


Bild 1-11: Bestimmung von LVE-Grenzspannung und Fließspannung τ_F aus dem Amplitudenversuch.

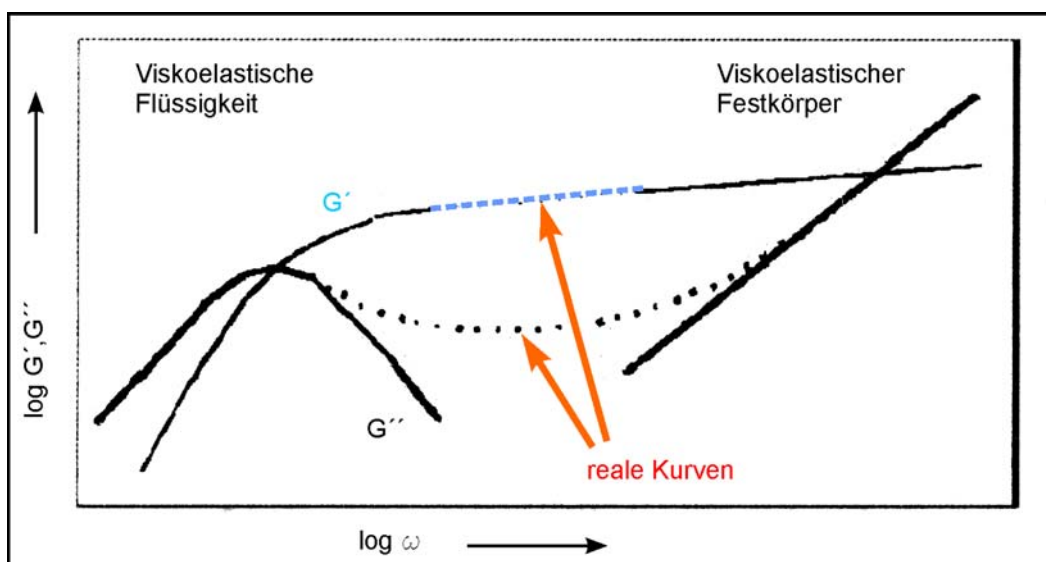


Bild 1-12: Ideales Verhalten und realer Frequenzverlauf der viskoelastischen Moduln eines 55%-igen Al_2O_3 -Schlickers bei $\gamma=0,005$ [GAU01, Seite 175].

Geraden mit der Hilfstangente, die durch den Plateauwert von G' im LVE-Bereich gebildet wird. Die Bruchspannung τ_B ist der Schubspannungswert des letzten Messpunktes vor dem Bruch.

1.5.4 Variation der Scherrate

Das gesamte viskoelastische Relaxationsspektrum wird durch die Variation der Scherrate im Frequenzversuch bei konstanter Dehnung bestimmt. Der Dehnungswert wird innerhalb des LVE gewählt, da sonst irreversible Verformungen die Ergebnisse verfälschen. Die Messung gibt Aufschluss über die Scherratenabhängigkeit der Elastizität und der inneren Reibung, plastische Verformungen sind vernachlässigbar. Die Scherrate beeinflusst das Gleichgewicht zwischen Trägheitskräften und Relaxationsvorgängen.

gen bei Einwirkung einer Last. Ein typischer Frequenzverlauf bei Prüfung einer keramischen Suspension zeigt Bild 1-12.

Das Minimum von G'' ist der Punkt geringster innerer Reibung. Bei geringeren Scherraten resultieren größere Reibungsverluste aus der Deformation der Grenzschicht (s. Abschnitt 1.3.3) und der unorientierten Anordnung der Partikel. Bei höheren Scherraten verringern Trägheitskräfte die Beweglichkeit und erhöhen die Reibung. Die Lage des Minimums ist abhängig von Partikelgröße, Feststoffanteil und Beschaffenheit des Binders. Mit steigender Viskosität des Binders verschiebt sich dieses Minimum hin zu höheren Scherraten, die Festkörpercharakteristik nimmt zu.

1.5.5 Variation der Temperatur

Die Änderung von Elastizität und innerer Reibung bei Erwärmung wird im Temperaturversuch bestimmt. Die bei konstanter Schubspannung und Scherrate im LVE-Bereich oszillierte Probe wird im Versuchsverlauf gleichmäßig erwärmt. So können die viskoelastischen Moduln als Funktion der Temperatur ermittelt werden. Der Versuch gibt Aufschluss über das Erweichungsverhalten der Werkstoffe. Mit steigender Temperatur lassen die Bindungskräfte des Polymers nach, die Feststoffpartikel werden beweglicher. Damit verbunden ist ein Nachlassen der Elastizität, eine Veränderung des Relaxationsverhaltens und ein verbessertes Fließverhalten.

1.6 Präzisierung der Aufgabenstellung

Stand der Technik beim Prägen von LTCC-Grünfolien ist die Beschreibung verschiedener Prozessbedingungen zum Strukturieren unterschiedlicher LTCC-Materialien. Dabei wird der Prägeprozesses anwendungsorientiert betrachtet (s. Abschnitt 1.2). Eine systematische Untersuchung von Werkstoffverhalten, Prozessführung und Abformergebnis erfolgte bisher nicht. Um die im Labor leicht umzusetzende Technologie in die Fertigung zu überführen, müssen grundlegende Zusammenhänge herausgearbeitet und der Prozess systematisch optimiert werden. Zum Verständnis der Abformung ist eine umfassendere Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Prozessbedingungen, Materialeigenschaften und Abformergebnis erforderlich. Hierzu soll die vorliegende Arbeit beitragen.

Eine Aufgabe besteht darin, mechanische Eigenschaften ausgewählter, kommerziell verfügbarer LTCC-Grünfolien in verschiedenen Belastungssituationen zu bestimmen und zu quantifizieren. Dazu zählen die plastische Verformung und Verdichtung beim Stauchen als Beschreibungsgrundlage des Materialverhaltens unter Drucklast (s. Abschnitt 1.4.6). Genutzt werden können die Materialprüfeinrichtungen am Institut für Werkstoffe, deren Anwendbarkeit auf die Charakterisierungsaufgabe geprüft werden muss. Rheologische Messungen bei Scherbelastung lassen Schlussfolgerungen auf die

Bindungskräfte zwischen Matrix und Füllstoffen und somit auf die Kraftverteilung im Gefüge zu (s. Abschnitt 1.3.3). Auch hier muss eine geeignete Prüfmethode ausgewählt und erprobt werden. Als weitere Materialcharakteristik ist die mit der Verdichtung einhergehende Änderung der Schwindung zur Beurteilung der Strukturformung beim Sintern zu untersuchen.

Aus den Ergebnissen der Materialprüfung sollen geeignete Kennwerte zur Beschreibung von elastischer Verformung, plastischer Verformung und Verdichtung herausgearbeitet und in Beziehung zum Prozess gesetzt werden, um Prozessparameter und Formgebung zu beurteilen. Aus diesen Untersuchungen sind Empfehlungen zum Entwurf und zur Prozessführung abzuleiten.

Die Klärung praktischer Fragen zur Fertigungsumsetzung ist ein weiteres Aufgabengebiet. Dazu zählen die mikrotechnische Herstellung geeigneter Werkzeuge, die Optimierung der Prozessführung sowie die Integration des Prägeschrittes in den Fertigungsablauf. Hier sollen Lösungen erarbeitet werden, die den technologischen Randbedingungen der LTCC-Fertigung entsprechen.

Die Vorteile der Technologie sollen an Anwendungsbeispielen demonstriert werden. Schwerpunkte sind hierbei auf die elektrische Funktionalisierung und die Herstellung fluidischer Strukturen zu setzen.

2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN LTCC-FOLIEN

2.1 Auswahl verfügbarer Grünfolien

Die in der Grünfolie ablaufende Vorgänge beim Prägen sind sehr komplex, da Oberflächenkräfte und physikalische Struktur das Verhalten bestimmen. Kommerziell sind verschiedenste LTCC-Folien verfügbar, die sich in Zusammensetzung und Eigenschaften stark unterscheiden. Aus dem großen Angebot werden drei Materialien ausgewählt, die unterschiedlichen Anwendungsfokus haben.

Ein verbreitetes Material ist die unter dem Handelsnamen GREEN TAPETM 951 vertriebene LTCC-Folie der E. I. DU PONT DE NEMOURS AND COMPANY (kurz DuPont). Im Materialsystem stehen vielfältige Funktionspasten zur Verfügung: Neben üblichen Leiterrezepturen auf Gold- oder Silberbasis bietet der Hersteller eine große Auswahl an schwindungskompatiblen Metallpasten und Dielektrika an, die für Cofire-Prozesse geeignet sind. Zusätzlich sind Widerstandspasten und Dielektrika zur Anwendung auf der gesinterten Keramik (Postfire-Prozess) verfügbar [DUP04]. Dieses große Pastenangebot erlaubt den Aufbau komplexer elektrischer Systeme und Multichipmodule, ergänzt durch fluidische Anwendungen [PET05, GON02, GOL06]. Standardisierte Schnittstellen zum modularen MEMS-Systemaufbau sind in dieser Keramik bereits realisiert [XMA09]. Im Rahmen dieser Arbeit wird für das Material die Bezeichnung DP951 verwendet.

Die W.C.HERAEUS GMBH bietet das Material CT700 an. Diese Basisfolie wird durch prozesskompatible, modifizierte Folien ergänzt, die vielfältige Anwendungen erlauben: Das Material CT707 ist für HF-Schaltungen optimiert, AHT03-003 als ferritisches Material ermöglicht die Integration elektromagnetischer Funktionselemente [MIK09] und AHT01-005 zeichnet sich durch eine besonders hohe Oberflächengüte aus, welche den direkten Aufbau von Oberflächenmikrosystemen ermöglicht. Die Kombination verschiedener Folien zu Multimaterialanordnungen ist möglich [HIN07]. Diese Vielfalt eröffnet einen großen Gestaltungsspielraum für mikromechanische Anwendungen. Zur Betrachtung in dieser Arbeit wird die Basisfolie ausgewählt und mit CT700 abgekürzt.

Als dritte Grünfolie wird eine anodisch bondbare Glaskeramikfolie, abgekürzt mit BGK, ausgewählt. Sie ist speziell für mikrosystemtechnische Aufbau- und Verbindungstechnik vom HERMSDORFER INSTITUT FÜR TECHNISCHE KERAMIK E.V. (kurz HITK) entwickelt. Die Füllstoffe sind so zusammengestellt, dass der Ausdehnungskoeffizient der gesinterten Keramik bis 450°C an den Ausdehnungskoeffizienten von

Silicium angepasst ist. Dadurch sind Siliciumchips direkt auf LTCC-Schaltungsträgern anodisch bondbar. Die Folie zeichnet sich durch eine sehr feine Pulveraufbereitung aus. Dadurch wird eine sehr geringe Rauheit von 200 nm ohne weitere Oberflächenbearbeitung erreicht [HIT08]. Die Versinterung mit Siliciumwafern im Drucksinterprozess zu einem Verbundsubstrat verspricht innovative Ansätze zur Makro-Nano-Integration [BAR08a, FIS09].

Die ausgewählten LTCC-Folien unterscheiden sich in ihrer Pulverzusammensetzung und im Binder. Es liegen bislang keine Daten der für den Umformprozess charakteristischen Größen wie Fließspannung oder Elastizität vor. Daher werden zunächst relevante Eigenschaften der Folien im Grünzustand untersucht. Dazu zählen in erster Linie die viskoelastischen Eigenschaften, gefolgt vom Werkstoffverhalten bei Stauchbelastung, welches experimentell im Flachsichtstauchversuch bestimmt wird, sowie das Verdichtungsverhalten und die daraus resultierende Beeinflussung der Schwindung.

2.2 Untersuchung des Feststoffanteils

Kommerzielle LTCC-Folien werden hinsichtlich verschiedenster Anwendungsaspekte optimiert. Während für Schaltungsträger im Hochfrequenzbereich vor allem das Dämpfungsverhalten von Bedeutung ist, muss bei Leistungsanwendungen die Wärmeableitung gewährleistet und bei Gehäuseanwendungen die thermische Dehnungen an die der Bauelemente angepasst sein, um Stress zu minimieren. Verschiedene Funktionseigenschaften der in Abschnitt 2.1 ausgewählten Grünfolien sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Als bestimmende Größe für die freie Oberfläche wird die physikalische Aufbereitung der Pulverkomponenten der Folien betrachtet. Wie aus Gleichung 1-2 und Gleichung 1-3 folgt, haben Größe und Form der Pulverbestandteile Einfluss auf den Verlustmodul des gefüllten Festkörpers.

Tabelle 2-1: Physikalische Eigenschaften der ausgewählten Mehrlagenkeramiken im gesinterten Zustand.

	DP951	CT700	BGK	Quellen
Thermische Dehnung [ppm/K]	5,5-5,8	6,7	3,4	[REB03, BAR08d]
Dichte [g/cm ³]	3,2	3,0	2,4	[REB03, BAR08d]
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	2-3	4,3	1,3-1,5	[REB03, BAR08d]
E-Modul [GPa]	152	170	40-50	[REB03, HER08, BAR08d]
Dielektr. Konstante bei 10MHz	7,8	7,9	5,35	[REB03, HIT08]

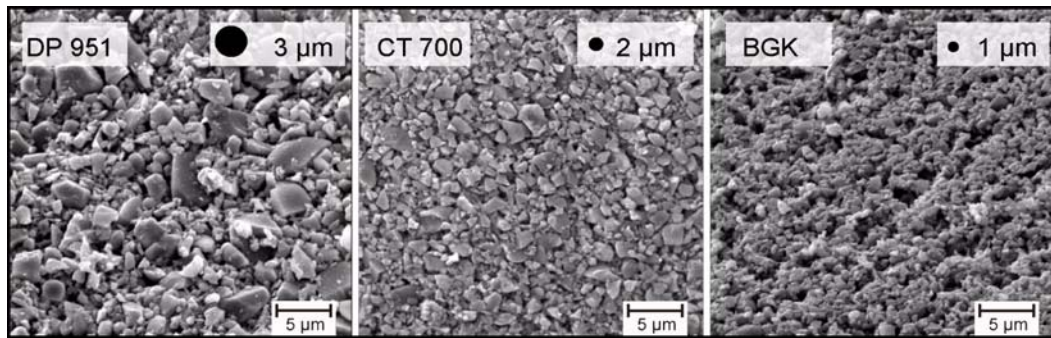


Bild 2-1: REM-Aufnahmen der Pulverkomponenten ausgewählter Folien.

Jeweils eine Materialprobe wird bei 450 °C entbindert und der verbleibende Feststoffanteil anschließend im /REM/ untersucht. Bild 2-1 zeigt die entstandenen Aufnahmen. Partikelgröße und Morphologie werden anhand der Aufnahmen qualitativ beurteilt. Auffällig ist, dass DP 951 große Partikel enthält. Der Durchmesser der größten Bestandteile übersteigt 3 µm. Neben der groben Pulverfraktion existiert noch eine feinere. Dies weist auf eine mehrmodale Kornverteilung hin. Laut Herstellerdatenblatt [DUP98] hat das Material eine Schwindung von 12,7 % ± 0,3 % in der Ebene und 15 % ± 0,5 % in z-Richtung. Dieser im Vergleich zu den beiden anderen Materialien geringe Wert und lässt auf eine dichte Packung der Feststoffe schließen. In der Literatur finden sich verschiedenen Angaben zur Zusammensetzung des Materials. DP951 enthält als primäre Phase ein Bleiborosilikatglas, CaZrO_3 und Al_2O_3 [HAR01, Seite 3.28]. Weitere Zusätze wie $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{SiAl})_4\text{O}_3$ sind enthalten [REB03], der Keramikanteil beträgt nach einer EDX-Analyse in [THE05] 48 %.

CT700 besteht aus feineren Partikeln, die gleichmäßig verteilt sind. Das gesinterte Material besteht zu 21 % aus Aluminiumoxidkeramik [THE05], statt Bleiborosilikatglas werden $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ und $(\text{Mg}, \text{Na}, \text{Ca})\text{SiO}_3$ als niedrig schmelzende Glasanteile verwendet [REB03]. Das Material schwindet laut Hersteller in der Ebene um 14,4 % und in der Höhe um 14,9 % [HER08].

Das Material BGK hat die feinste Körnung, die Verteilung ist wie bei CT700 gleichmäßig. Die Partikel haben Abmessungen im Submikrometerbereich. Die niedrig schmelzende Glasphase bildet ein Borosilikatglas, Cordierit dient der Einstellung der thermischen Dehnung. Die Schwindung wurde im Laborversuch ermittelt und beträgt in der Ebene 17,1 % bei einer Standardabweichung von 0,6 %, in der Höhe bis zu 20 % und ist damit bei dieser Folie am größten.

Die unterschiedlichen Pulverzusammensetzungen beeinflussen neben der Organik das mechanische Verhalten der Grünfolien, das in Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4 betrachtet wird. Verdichtung und Schwindung werden in Abschnitt 2.5 diskutiert.

2.3 Viskoelastische Eigenschaften von LTCC-Grünfolien

2.3.1 Versuchsanordnung und Probenpräparation

Zum Verständnis des Prägens von viskoelastischen Festkörpern ist die Kenntnis des Stoffverhaltens unter Krafteinwirkung erforderlich. Rheologische Messungen geben Aufschluss über Elastizität, innere Reibung und Belastungsgrenzen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, Vorbehandlungen und Belastungen. In Abschnitt 1.5 ist das viskoelastische Modell zur Beschreibung von LTCC-Grünfolien erklärt. Relevante viskoelastische Parameter der in Abschnitt 2.1 ausgewählten Grünfolien werden hier experimentell untersucht. Die Messungen erfolgen mit einem Oszillationsrheometer in einer temperierten Klimakammer /APaar/. Bild 2-2 stellt die Messanordnung schematisch dar.

Zur Festkörperprüfung werden Lamine in einer Klemmvorrichtung unten gestellfest und oben luftgelagert aufgespannt. Sie wirken als Torsionsfeder im Oszillationsrheometer. Die Anordnung befindet sich in einer Klimakammer, welche die genaue Temperierung der Probe während des Versuches gewährleistet. Länge, Breite und Höhe der Probe müssen ca. $30 \cdot 10 \cdot 1 \text{ mm}^3$ betragen, um die auf das Messsystem abgestimmte Federsteifigkeit zu erhalten. Entsprechende Teststreifen werden aus mehreren Einzellaugen der jeweiligen LTCC-Grünfolien hergestellt, so dass sich die geforderte Dicke von ca. 1 mm ergibt. Zunächst werden die Grünfolien 10 min bei 80°C getrocknet und anschließend bei 70°C für 10 min uniaxial bei einem Druck von 20 MPa laminiert. Der Zuschnitt auf die erforderliche Geometrie erfolgt mit einer Handhebelschere, die Messung der tatsächlichen Länge, Breite und Dicke mit einem Messschieber. Zur Untersuchung des Verdichtungseinflusses werden aus der Folie DP951 Proben bei einem verminderten Laminationsdruck von 10 MPa und einem erhöhtem Laminationsdruck von 100 MPa präpariert.

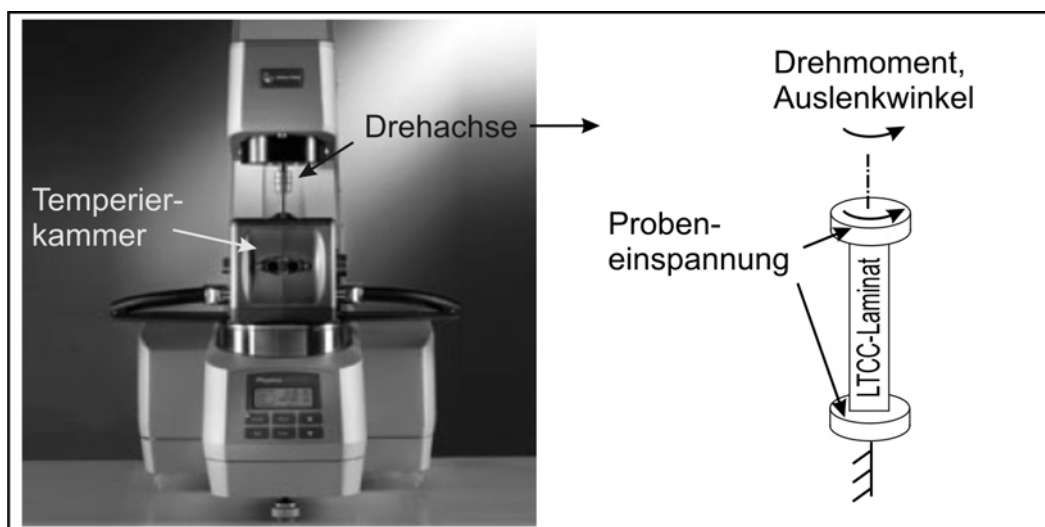


Bild 2-2: Versuchsanordnung im Rheometer MCR 301, Foto links aus [PAA06].

Eine leichte Vorspannung der vorgefertigten Lamine in der Aufhängung mit einer Zugkraft von 1N stellt definierte Versuchsbedingungen sicher. Vor Versuchsbeginn werden die Proben jeweils 5 min bei Prüftemperatur temperiert. Bei Kriechversuchen erfolgt die Einspannung nach der Temperierungsphase ohne Vorspannkraft.

Bei deformations geregelter Durchführung der Oszillationsmessungen wird der Auslenkwinkel des Messsystems, dessen Umrechnung in die Deformation γ über eine spezifische Gerätekonstante erfolgt, als Zeitfunktion vorgegeben. Die daraus resultierende Schubspannungsfunktion wird aus der Zeitfunktion des gemessenen Drehmoments ermittelt. Somit sind der Kraft-Weg-Verlauf und die Phasenlage bekannt. Durch Variation der Versuchsparameter (s. Abschnitt 1.5) wird das viskoelastische Verhalten unter verschiedenen Prozessbedingungen untersucht.

Amplitudenversuche

Amplitudenversuche dienen der Bestimmung der Grenzspannungen τ_{LVE} und τ_F nach der in Bild 1-11 dargestellten Methode. Sie werden für alle Folien bei einer Kreisfrequenz von 10 rad/s durchgeführt. Aus den Messkurven errechnen sich Speichermodul, Verlustmodul und die zulässige Maximaldehnung. Falls nicht abweichend angegeben, beträgt die Versuchstemperatur 60°C. Diese Temperatur liegt an der unteren Grenze der empfohlenen Laminationstemperatur. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Polymerbinder aller drei Materialien bereits ihre Transformationstemperatur überschritten haben. Jeweils drei Proben der in Abschnitt 2.1 ausgewählten Grünfolien werden bei gleichen Versuchsbedingungen geprüft. Im Versuchsverlauf wird die Dehnungsamplitude beginnend bei 0,001 % logarithmisch bis zum Bruch der Probe gesteigert. Die Spannungs-Dehnungs-Kennlinien aller Materialien sind in Bild 2-3 dargestellt. Bild 2-4 zeigt den Verlauf der viskoelastischen Speicher- und Verlustmoduln G' und G'' . Ihre Mittelwerte sowie die Standardabweichungen in Prozent bezogen auf den Mittelwert sind in Tabelle 2-2 angegeben.

Die Grenzspannung τ_{LVE} wird als die Spannung ermittelt, bei welcher der Toleranzbereich von 5 %, bezogen auf den Plateauwert des Speichermoduls G' , verlassen wird. Die Fließspannung τ_F ist der Schnittpunkt der aus den Messwerten nach Überwinden der Fließzone approximierten Geraden mit einer Hilfstangente auf Höhe des Plateauwertes. Die Methoden zur Bestimmung der Grenzwerte sind in Abschnitt 1.5 anschaulich erläutert. Die Grenzdehnung des LVE-Bereichs ist die der Spannung τ_{LVE} zugeordnete Dehnung γ_{LVE} . Tabelle 2-2 fasst die gemittelten Kennwerte aus den Messungen und die Standardabweichungen zusammen.

Das Material DP951 wird zusätzlich bei 80°C und 100°C geprüft. In Bild 2-13 sind die Messkurven dargestellt. In Tabelle 2-2, Spalte DP951@80°C bzw. DP951@100°C sind die Kennwerte aus diesen Messungen zu finden.

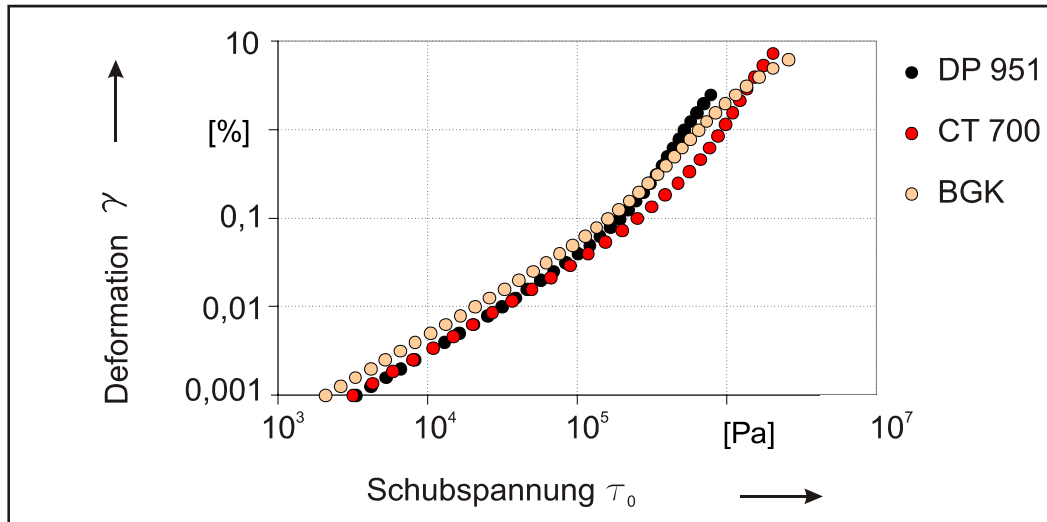


Bild 2-3: Spannung-Dehnungs-Kurven der LTCC-Grünfolien im Vergleich, ermittelt im Oszillationsversuch bei 60°C und 10 rad/s.

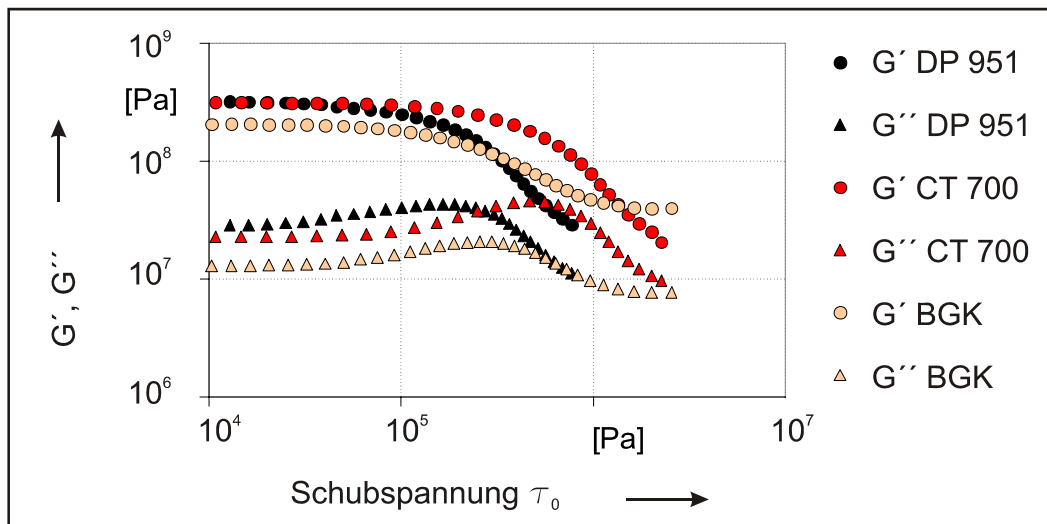


Bild 2-4: Viskoelastische Moduln der LTCC-Grünfolien im Vergleich, ermittelt im Amplitudenversuch bei 60°C und 10 rad/s.

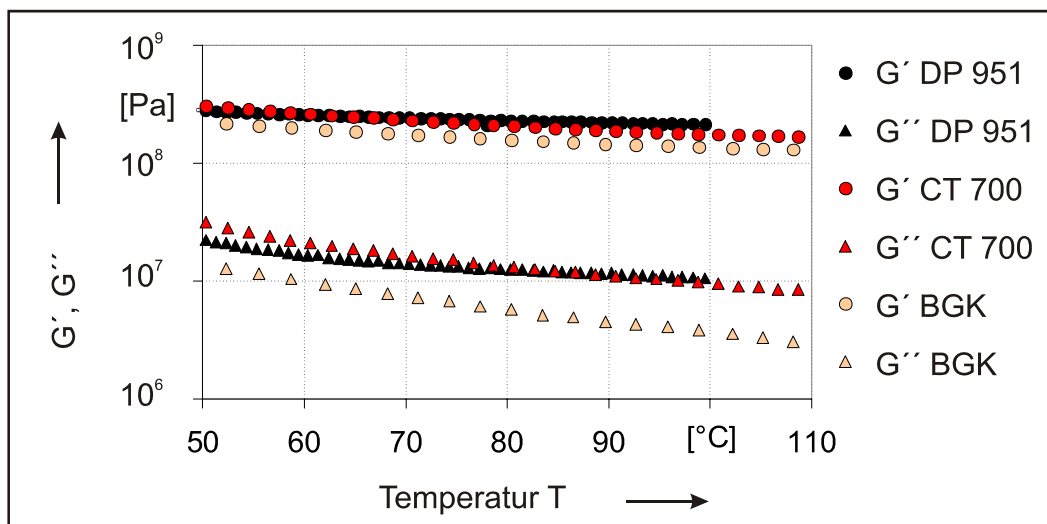


Bild 2-5: Temperaturverhalten der LTCC-Grünfolien im linear viskoelastischen Bereich im Vergleich.

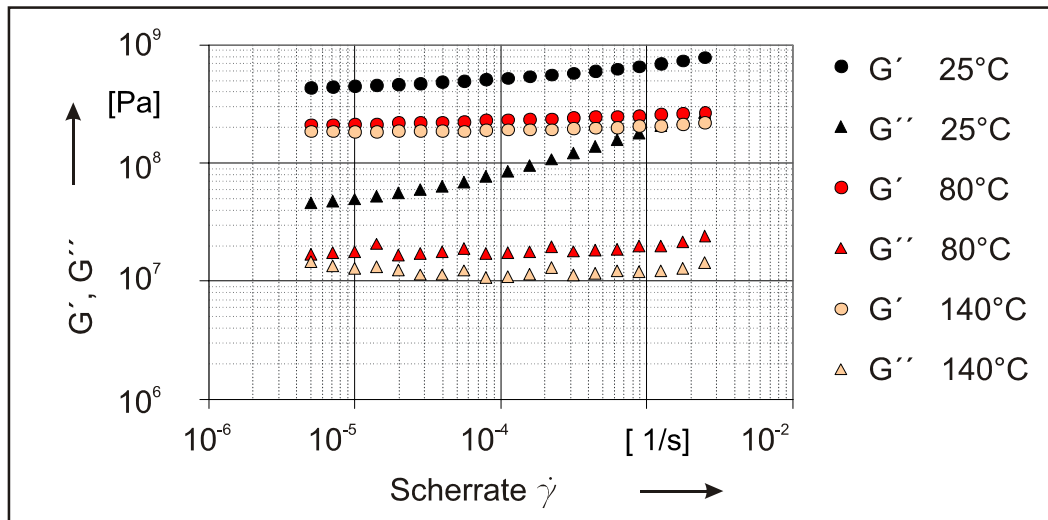


Bild 2-6: Frequenzgang der viskoelastischen Moduln von DP 951 bei verschiedenen Temperaturen.

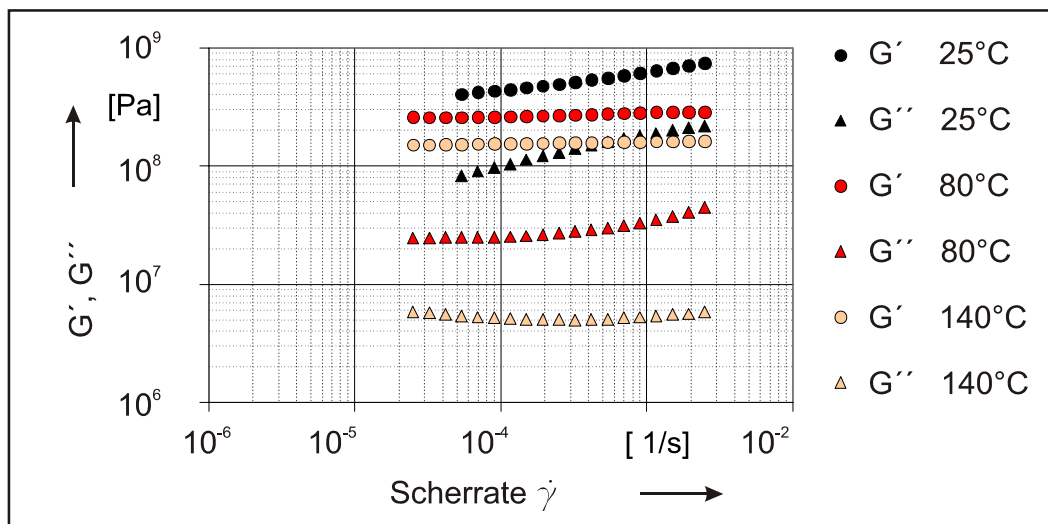


Bild 2-7: Frequenzgang der viskoelastischen Moduln von CT 700 bei verschiedenen Temperaturen.

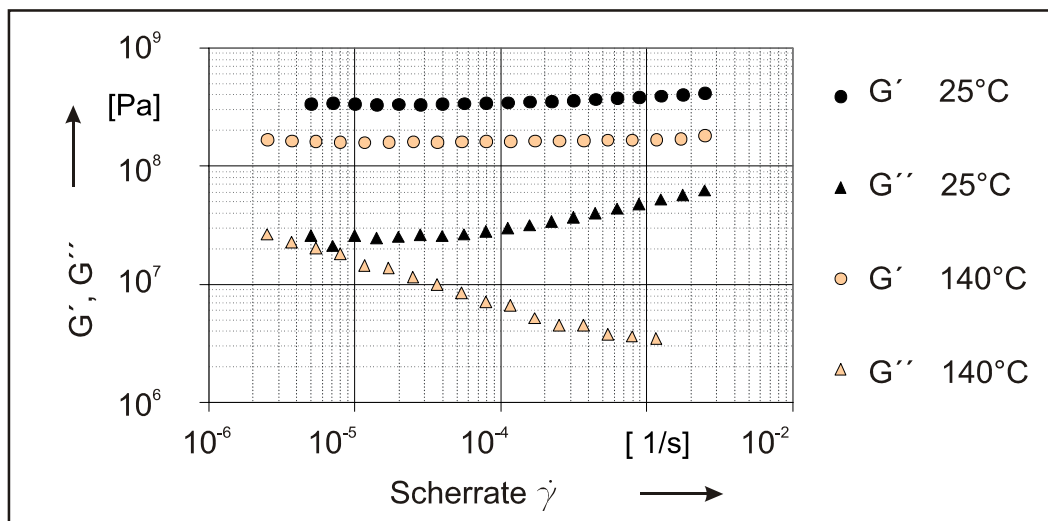


Bild 2-8: Frequenzgang der viskoelastischen Moduln von BGK bei verschiedenen Temperaturen.

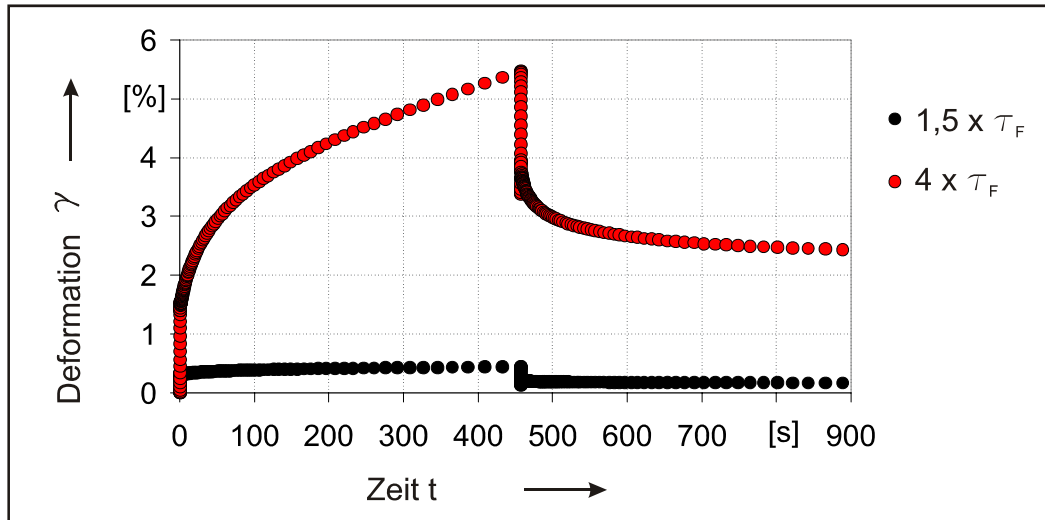


Bild 2-9: Kriech-Erholungs-Kurve von DP951, aufgenommen bei 60°C und 1,5-facher bzw. 4-facher Fließspannung.

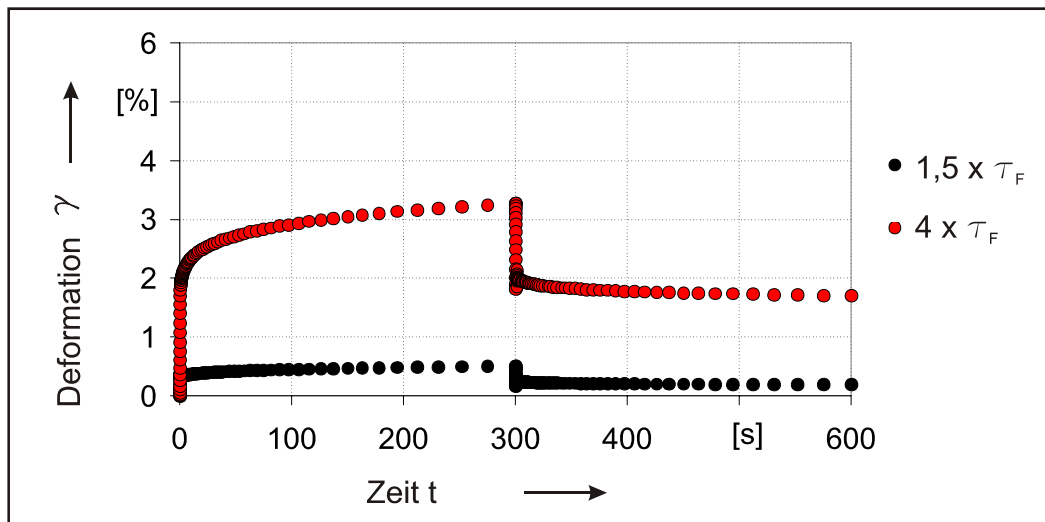


Bild 2-10: Kriech-Erholungs-Kurve von CT700, aufgenommen bei 60°C und 1,5-facher bzw. 4-facher Fließspannung.

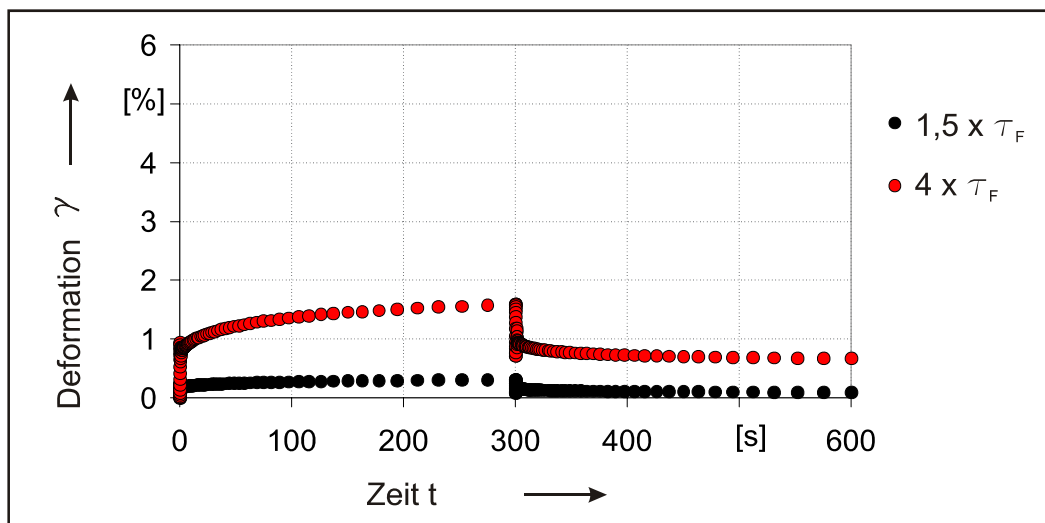


Bild 2-11: Kriech-Erholungs-Kurve von BGK, aufgenommen bei 60°C und 1,5-facher bzw. 4-facher Fließspannung.

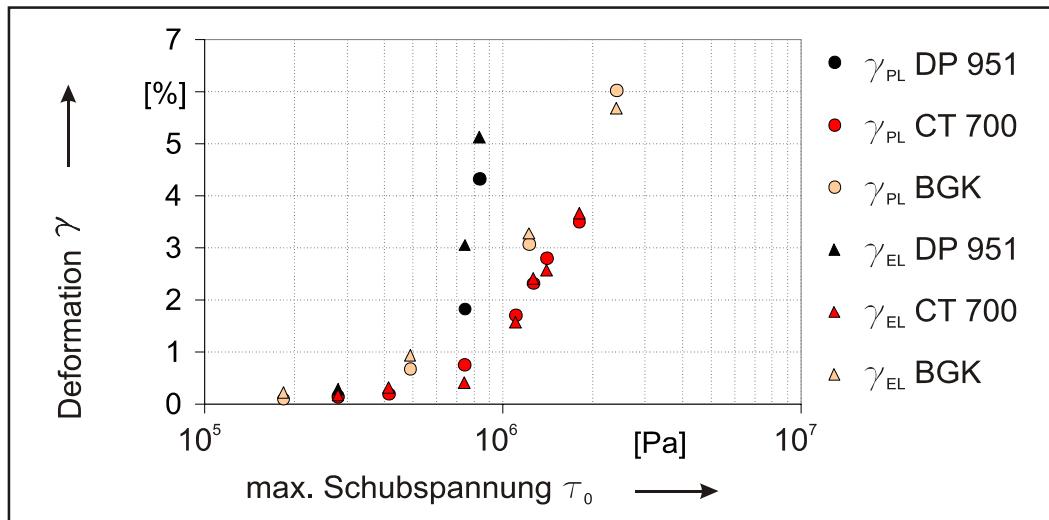


Bild 2-12: Plastische und elastische Deformation γ , ermittelt im Kriechversuch bei 60°C nach einer Prüfzeit von 300s.

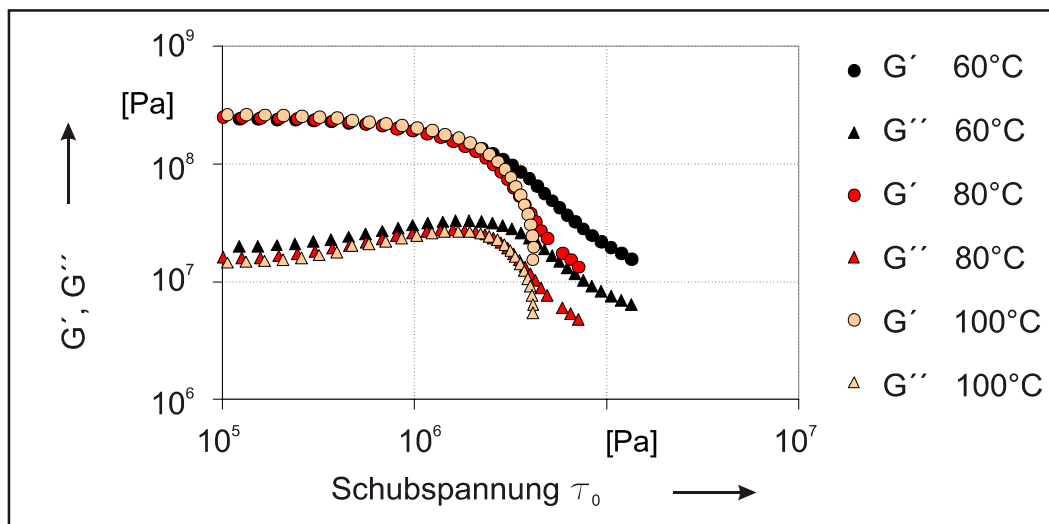


Bild 2-13: Viskoelastische Moduln von DP951, ermittelt im Amplitudenversuch bei verschiedenen Temperaturen.

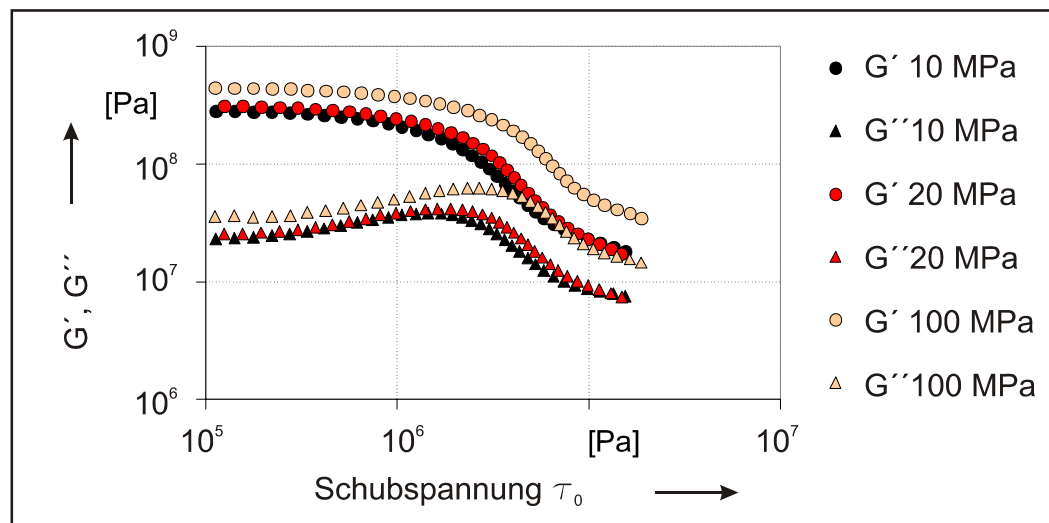


Bild 2-14: Viskoelastische Moduln von DP951, ermittelt an bei verschiedenen Drücken laminierten Proben.

Tabelle 2-2: Zusammenfassung der im Amplitudenversuch ermittelten Materialkennwerte der LTCC-Grünfolien z. T. unter variierten Prüfbedingungen.

Folie	G' [MPa]	G'' [MPa]	γ_{LVE} [%]	τ_{LVE} [kPa]	τ_F [kPa]
DP951	$318 \pm 3 \%$	$26 \pm 5 \%$	$0,013 \pm 7 \%$	$39 \pm 7 \%$	$186 \pm 4 \%$
CT700	$312 \pm 5 \%$	$23 \pm 3 \%$	$0,024 \pm 2 \%$	$133 \pm 6 \%$	$275 \pm 6 \%$
BGK	$267 \pm 9 \%$	$14 \pm 11 \%$	$0,073 \pm 5 \%$	$99 \pm 16 \%$	$122 \pm 19 \%$
DP951 @80 °C	253	16	0,013	32	132
DP951 @100 °C	200	14	0,09	16	62
DP951 @10 MPa	274	23	0,012	33	125
DP951 @100 MPa	450	35	0,015	67	219

Zur Untersuchung des Verdichtungseinflusses werden Materialproben aus DP951 bei 10 MPa bzw. 100 MPa laminiert und geprüft. Ihre Kennwerte sind in Tabelle 2-2 in den Spalten DP951@10 MPa bzw. DP951@100 MPa aufgelistet, die Messkurven in Bild 2-14 dargestellt.

Temperaturversuch

Die Temperaturabhängigkeit der Moduln G' und G'' wird unter definierten Scherbedingungen im LVE-Bereich ermittelt. Die gemäß Abschnitt 2.3.1 vorbereiteten LTCC-Streifen werden in der Probenaufnahme des Rheometers mit einer Kraft von 1 N vorgespannt und bei einer Kreisfrequenz von 10 rad/s oszilliert. Im Versuchsverlauf erfolgt die deformationsgeregelte Messung der Moduln mit einer konstanten Maximaldeformation von 0,005% bei gleichzeitiger Erwärmung mit einer Heizrate von 2 K/min von Raumtemperatur auf 140 °C. Die Prüfung der DP951-Folie wurde bei 100 °C abgebrochen, da keine wesentliche Änderung der Moduln mehr zu beobachten war. Die Messkurven sind in Bild 2-5 dargestellt.

Frequenzversuch

Der Scherrateneinfluss auf die viskoelastischen Moduln wird im Frequenzversuch betrachtet. Dabei wird die Kreisfrequenz der Erregerfunktion logarithmisch von 50 s^{-1} bis $0,1 \text{ s}^{-1}$, entsprechend einer Scherrate von $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ bis $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, variiert. Der Versuch erfolgt bei einer konstanten Deformation von 0,005%. Die Materialien werden bei verschiedenen Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 140 °C geprüft, Bild 2-6 bis Bild 2-8 zeigen die Messergebnisse.

Kriecherholungsversuche

Aussagen zu plastischer und elastischer Deformation sowie transienten Vorgängen liefern Kriech-Erholungs-Versuche. LTCC-Streifen werden mit einer Schubspannungssprungfunktion der Höhe τ_{\max} belastet und die resultierende Deformation in logarithmischen Zeitintervallen von 0,01 s bis 25 s aufgezeichnet. Nach Verstreichen einer festgelegten Prüfzeit wird die Schubspannung abgeschaltet und die Deformation mit gleicher Zeitauflösung wie in der Belastungsphase für die festgelegte Prüfzeit aufgezeichnet.

Die Prüftemperatur beträgt 60°C. Zusätzlich wird das Material DP951 bei 100°C geprüft, um den Temperatureinfluss auf den Kurvenverlauf zu untersuchen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wird die Prüfspannung materialabhängig jeweils bei $1,5\tau_F$ bzw. $4\tau_F$ gewählt. Die Werte der eingepprägten Schubspannungen für die einzelnen Materialien sind in Tabelle 2-3 angegeben. Die materialspezifische Untersuchung elastischer und plastischer Dehnungsanteile zur Darstellung in Bild 2-12 bei vergleichbarer Belastung erfolgt bei weiteren Spannungswerten.

Die Prüfung erfolgt jeweils über eine Zeitspanne von 300 s in der Belastungs- und Erholungsphase. Abweichend wurde das Zeitintervall bei Aufnahme der Kriech-Erholungskurve von DP951 in Bild 2-9 verlängert, da hier die transienten Vorgänge erst nach 240 s abklingen. Die Messkurven für CT700 zeigt Bild 2-10 und die von BGK Bild 2-11. Typische Parameter des BURGERS-Modells werden durch Approximation der Messwerte nach Gleichung 1-41 ermittelt, das Auswerteverfahren ist in Bild 1-10

Tabelle 2-3: Materialabhängige Schubspannungswerte zur Belastung im Kriech-Erholungs-Versuch.

Material	τ_F [kPa]	$\tau_{\max}=1,5 \times \tau_F$ [kPa]	$\tau_{\max}=4 \times \tau_F$ [kPa]
951	186	279	743
CT700	275	413	1.100
BGK	122	183	488

Tabelle 2-4: Parameter des BURGERS-Modells, ermittelt aus dem Kriechversuch.

Material	t_{tr} [s]	$\gamma_{\text{plast}@1,5}$ [%]	$\gamma_{\text{plast}@4}$ [%]	$\eta_{N@1,5}$ [GPas]	$\eta_{N@4}$ [GPas]
DP 951	240	0,155	1,827	n.A.	n.A.
CT 707	150	0,193	1,705	205	85
BGK	190	0,098	0,672	145	79
DP951 450s @ 60°C	240	0,175	2,427	188	14
DP 951 450s @ 100°C	260	0,622	Bruch	70	Bruch

grafisch erläutert. Tabelle 2-4 fasst die Werte der Viskosität η_N und die Abklingzeiten der transienten Vorgänge t_{tr} bei unterschiedlichen Belastungen zusammen.

Plastische und elastische Deformation werden direkt aus der Messkurve abgelesen. Die elastische Deformation γ_{EL} ergibt sich als Differenz der maximal erreichten Deformation γ_{max} und der plastischen Deformation γ_{PL} (s. Bild 1-10). Alle Deformationswerte sind in Tabelle 2-4 aufgelistet. Veranschaulichend sind elastische und plastische Dehnung in Bild 2-12 als Funktion der Schubspannung in Diagrammform dargestellt.

2.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Spannungs-Dehnungs-Kurven viskoelastischer Werkstoffe können, wie in Abschnitt 1.5 beschrieben, in drei Bereiche eingeteilt werden. Diese finden sich in der Messkurven der untersuchten Grünfolien in Bild 2-3 und Bild 2-4 wieder.

Im linear viskoelastischen Bereich, der sich bis zur Grenzspannung τ_{LVE} erstreckt, ist der Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie konstant. Charakteristische Größe für die Elastizität ist der Speichermodul G' . Die BGK-Folie weist die höchste Elastizität auf, die Moduln von DP951 und CT700 sind ähnlich. Auch der Verlustmodul G'' der BGK-Folie ist am geringsten, gefolgt von CT700 und DP951.

An den elastischen Bereich schließt sich die Fließzone an, die durch eine allmähliche, unterschiedlich stark ausgeprägte Krümmung der Kurvenverläufe, sowohl in der Spannungs-Dehnungs-Darstellung (Bild 2-3), als auch im Verlauf der Moduln (Bild 2-4), gekennzeichnet ist. Sie beginnt mit der Grenzspannung des LVE-Bereichs τ_{LVE} . Bei Überschreiten der Belastungsgrenze beginnen Bindungen zu reißen. Im Material bilden sich erste Mikrorisse und bedingen eine Abschwächung des Feststoffzusammenhalts, wodurch die Moduln sinken. Bestimmend für den Kurvenverlauf ist hier vor allem die Dehnbarkeit des Matrixpolymers. Diese hängt vom Vernetzungsgrad und der Polymerkettenlänge ab, weiteren Einfluss auf das Verhalten haben der mittlere Abstand der Füllstoffpartikel, ihr Durchmesser und die Größenverteilung der Feststoffe. Am signifikantesten unterscheiden sich die Materialien BGK und DP951. Die Grenze des LVE-Bereichs ist bei DP951 bereits bei geringen Schubspannungen erreicht, gefolgt von BGK und CT700. Die dem Spannungswert entsprechende Grenzdehnung γ_{LVE} ist jedoch bei BGK am höchsten (s. Tabelle 2-2). Dieses Material ist zäh, gekennzeichnet durch eine ausgedehnte Fließzone, verbunden mit einem langsamen Abfall der Moduln und einer nur allmählichen Änderung des Anstiegs der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Daraus resultiert die geringste Fließspannung τ_F im Versuch (siehe Tabelle 2-2). DP951 zeichnet sich hingegen durch eine besonders schmale Fließzone aus. Die Moduln fallen schnell ab, die Spannungs-Dehnungs-Kurve ändert ihren Anstieg in einem kleinen Spannungsintervall. Dies lässt auf geringe Bindungskräfte des Polymers

schließen. Die Fließspannung τ_F liegt mit 186 kPa zwischen der von BGK und CT700. Das Material ist nur geringfügig dehnbar. CT700 ist das belastbarste der betrachteten Materialien mit der größten Fließspannung.

An die Fließzone schließt sich ein annähernd linearer Kurvenverlauf bis zum Bruch an. DP951 zeigt die geringste Bruchspannung im Versuch, es versagt bereits bei Spannungen unter 1 MPa. Die Bruchspannung von BGK ist nur geringfügig höher als die von CT700, beide Werte betragen etwa 3 MPa.

Einfluss der Schergeschwindigkeit

Scherratenversuche betrachten den Zeiteinfluss im Deformationsverhalten einer Substanz und lassen so Rückschlüsse auf zeitabhängige Prozessgrößen wie zum Beispiel die Umformgeschwindigkeit zu. Das typische Verhalten keramischer Suspensionen bei Variation der Scherrate in Oszillationsversuchen ist in Abschnitt 1.5.4 beschrieben. Der Verlustmodul G'' weist üblicherweise ein Minimum auf, bei geringeren Scherraten verhält sich die Suspension strukturviskos, zu größeren hin scherverfestigend (vgl. Bild 1-12). Die Ursache hierfür liegt im Gleichgewicht zwischen den Trägheitskräften der Partikel und der Dämpfung durch den Binder.

Die gemessenen Verläufe sind in Bild 2-6 bis Bild 2-8 dargestellt. Bei Raumtemperatur verhalten sich alle drei Materialien scherverfestigend. Die innere Reibung, verkörpert durch den Verlustmodul G'' , steigt mit der Scherrate an. Die Verluste sind geprägt durch die Verformung der Bindermatrix und Umordnen der Bindungen zwischen Füllstoff und Matrix. Bei Temperaturerhöhung steigt die Beweglichkeit der Füllstoffe in der erweichenden Matrix. Dadurch können die Partikel der Bewegung folgen, sich umordnen und so den Fließwiderstand verringern. Beim Material DP951 ist diese Phase, welche durch einen konstanten Verlauf der viskoelastischen Moduln gekennzeichnet ist, im betrachteten Frequenzintervall bereits bei 80°C erreicht, bei CT700 erst bei 140°C.

BGK verhält sich bei 140°C strukturviskos. Herrschen geringe Scherraten, haben die Feststoffteilchen genug Zeit, in ihre Ruhelage zurück zu schwingen. Mit steigender Scherrate werden die Partikel schneller verschoben, als sie relaxieren können und die Scherung bewirkt eine Orientierung, die den Fließwiderstand und damit die Moduln sinken lässt.

Kriech-Erholungs-Verhalten

Kriecherholungskurven stellen den Zeitverlauf der Dehnung, wie bereits einführend in Abschnitt 1.5 erläutert, anschaulich dar. Bei Vergleich der Messkurven in Bild 2-9 bis Bild 2-11 zeichnet sich ein markanter Unterschied zwischen dem Kurvenverlauf der Folie DP951 und dem der Vergleichsfolien ab. Die Viskosität η_N , gekennzeichnet

durch den Anstieg der Belastungskurve, wird bei diesem Material signifikanter durch die Schubspannung beeinflusst. Die Werte in Tabelle 2-4 zeigen, dass die Viskosität η_N von BGK und CT700 bei Belastung mit 4-facher Fließspannung um mehr als das 4-fache höher ist als die von DP951. Bei CT700 ist dieser Kennwert stärker von der Schubspannung abhängig als bei BGK.

DP951 weist die längste Abklingzeit t_{tr} auf, gefolgt von CT700. Die größte plastische Deformation γ_{PL} im Versuch zeigt ebenfalls DP951. Plastische und elastische Deformationsanteile aller Materialien werden in Bild 2-12 verglichen. Der Darstellung kann man entnehmen, dass DP951 bereits bei geringen Schubspannungen um 1 MPa gut verformbar ist. Die Deformationen steigen signifikant mit der Belastung an. BGK und CT700 benötigen höhere Belastungen zur plastischen Verformung. Die plastischen und elastischen Anteile γ_{PL} bzw. γ_{EL} sind jeweils in etwa gleich groß.

Eine Temperaturerhöhung von 60°C auf 100°C, betrachtet am Beispiel von DP951, führt zu einem signifikanten Abfall der Viskosität η_N von 188 GPa s auf 70 GPa s (s. Tabelle 2-4) und damit zu besserer Verformbarkeit. Die Deformation verdreifacht sich in etwa. Die Abklingzeit verlängert sich geringfügig.

Temperaturabhängigkeit der Moduln

Die Erweichung des Binders bei Überschreitung der Transformationstemperatur führt zur Abschwächung der Bindungskräfte und damit zur Verminderung des Speichermoduls G' . Feststoffpartikel können aneinander abgleiten und sich besser umordnen. Wechselwirkungen zwischen den Partikeln, welche der Relativbewegung entgegen wirken, werden makroskopisch als innere Reibung erfasst und durch den Verlustmodul G'' beschrieben (s. Abschnitt 1.5.5).

Die im Temperaturversuch experimentell ermittelten Modulverläufe sind für alle Materialien in Bild 2-5 dargestellt. Die Speichermoduln G' aller Materialien reduzieren sich nur geringfügig im betrachteten Temperaturintervall.

Bei DP951 ist der stärkste Abfall des Verlustmoduls bis zu einer Temperatur von ca. 60°C zu beobachten, er fällt um ca. eine Dekade von $1,4 \cdot 10^8$ Pa auf $1,7 \cdot 10^7$ Pa. Zwischen 60°C und 70°C ist ein Abfall auf $1,4 \cdot 10^7$ Pa zu verzeichnen, der Wert reduziert sich bis 80°C auf ca. $1,2 \cdot 10^7$ Pa und fällt dann nur noch unwesentlich. Die Polymermatrix erweicht signifikant im Temperaturbereich bis 60°C.

Auch bei CT700 fällt der Verlustmodul bis 60°C am stärksten ab, der Wert reduziert sich um fast eine Dekade von $1,8 \cdot 10^8$ Pa auf $2,1 \cdot 10^7$ Pa. Zwischen 60°C und 80°C ist ein Abfall auf $5,7 \cdot 10^6$ Pa zu verzeichnen. Die Messkurve fällt mit der Temperaturerhöhung weiter ab.

BGK hat im Vergleich den geringsten Verlustmodul. Der Abfall beträgt weniger als eine Dekade und verläuft stetig im gesamten Temperaturintervall. Der Anfangswert

beträgt bei Raumtemperatur $2,6 \cdot 10^7$ Pa reduziert sich auf $1,0 \cdot 10^7$ Pa bei 60°C und im weiteren Verlauf bis 80°C auf $5,6 \cdot 10^6$ Pa. Ein möglicher Grund für den moderateren Kurvenverlauf ist die feinere Pulveraufbereitung des Materials (s. Abschnitt 2.2) und eine damit verbundene Vergrößerung der Oberfläche, welche zur Dominanz von Adhäsion und Reibung über die Volumeneigenschaften der Polymermatrix führt. Eine weitere mögliche Ursache ist ein größerer Erweichungsbereich des Polymers.

Bisher ist der Temperatureinfluss nur bei kleinen, reversiblen Deformationen im LVE untersucht und lässt Schlüsse auf die innere Reibung zu. Das Fließverhalten der Werkstoffe wird jedoch erst bei großen Belastungen deutlich. Zur Prüfung eignen sich Amplitudenversuche bei unterschiedlichen Temperaturen. Bild 2-13 zeigt drei Messkurven bei 60°C , 80°C und 100°C an DP951-Proben. Die Moduln unterscheiden sich im LVE-Bereich nur geringfügig. Stark beeinflusst wird der Kurvenverlauf nach Überschreiten der LVE-Grenzspannung. Die Erweichung des Binders bewirkt eine reduzierte Zähigkeit und Dehnbarkeit der Polymermatrix, zu erkennen am abrupten Abfall der Moduln. Die Fließspannung τ_F verschiebt sich mit steigender Prüftemperatur zu geringeren Spannungen (siehe Tabelle 2-2). Sie beträgt bei 60°C 186 kPa, verringert sich um 33 % auf 132 kPa bei 80°C und bei 100°C um 67 % auf 62 kPa.

Einfluss der Verdichtung auf die Moduln

Bei Verdichtung vergrößern sich durch das Schließen von Poren die Bindungsfläche zwischen Pulverpartikeln und Polymer. Die erhöhte Anpresskraft führt zusätzlich zu engerem Kontakt zwischen Binder und Füllstoffen. Diese beiden Faktoren bewirken eine Festigkeitssteigerung. Die damit verbundene Beeinflussung der Fließspannung τ_F ist anhand des Materials DP951 betrachtet. LTCC-Laminate, laut Abschnitt 2.3.1 bei 10 MPa, 20 MPa und 100 MPa vorbereitet, wurden geprüft. Die Präparation bei 20 MPa entspricht dem Standardverfahren und dient als Bezug. Bild 2-14 zeigt die Messkurven. Die Fließspannung τ_F steigt mit zunehmender Verdichtung. Bei einem Laminationsdruck von 10 MPa stellt sich ein Wert von 125 kPa ein, das entspricht einer Verringerung um ca. 30 % bezogen auf den Wert bei Standardlamination, welcher 186 kPa beträgt. Bei 100 MPa ergibt sich eine Steigerung um ca. 17 %, τ_F beträgt hier 218 kPa. Die Beeinflussung der Fließspannung durch die Verdichtung der Laminate im betrachteten Parameterbereich ist weniger stark ausgeprägt als die durch die Temperaturänderung.

2.4 Flachsichtstauchversuch

2.4.1 Versuchsziel

In der klassischen Umformtechnik wird die Fließspannung als die Spannung definiert, bei der im einachsigen Belastungsfall eine plastische Verformung beginnt. Da diese Spannung nicht nur eine Funktion des Werkstoffes, sondern auch der Umformtemperatur, Umformgeschwindigkeit und Vorbehandlung ist, werden Fließkurven unter anwendungsnahen Prozessbedingungen aufgenommen. Zur Beurteilung von Verfahren mit direkter Druckeinwirkung dienen Stauchversuche, Blech- und Folienmaterialien werden im Schichtstauchversuch geprüft.

Schichtstauchversuche an Blechen werden vorzugsweise mit einer Stapelhöhe von mindestens doppeltem Prüflingsdurchmesser durchgeführt, da die Reibung bei den so ermittelten Fließkurven vernachlässigt werden kann. Ist eine solche Stapelhöhe nicht realisierbar, so spricht man vom Flachsichtstauchversuch, die Reibung muss hier berücksichtigt werden.

LTCC-Folien sind im Vergleich zu Metallblechen weich und labil, Folienstapel mit einer Höhe von 8 mm bei einem Durchmesser von 4 mm lassen sich nicht zuverlässig prüfen. Daher können die Eigenschaften nur im Flachsichtstauchversuch ermittelt werden. Ziel der Materialprüfung ist die Ermittlung der Umformwiderstände beim Stauchen für die in Abschnitt 2.1 ausgewählten LTCC-Grünfolien. Der Temperatureinfluss wird durch die Messung bei Raumtemperatur und bei ca. 60°C betrachtet. Aus den Daten wird der Kraftbedarf für den Umformprozess abgeschätzt und das Fließverhalten bei Druckbelastung charakterisiert.

2.4.2 Versuchsdurchführung

Die ausgewählten Grünfolien (s. Abschnitt 2.1) werden in 3·3 cm² große Teile geschnitten und bei 80°C für 10 min im Umluftofen getrocknet. Die vorbereiteten Einzelagen werden anschließend zu Stapeln mit einer Höhe von ca. 1 mm übereinander gelegt. Der Versuchsplan in Tabelle 2-5 gibt Prüftemperatur und Stapelhöhe an.

Tabelle 2-5: Plan zur Durchführung des Schichtstauchversuches.

Probe Nr.	Material	Temperatur [°C]	Stapelhöhe h_0 [mm]
01	DP951	25	1,02
02	DP951	60	1,02
03	CT 700	25	0,95
04	CT 700	60	0,95
05	BGK	25	0,99
06	BGK	60	0,99

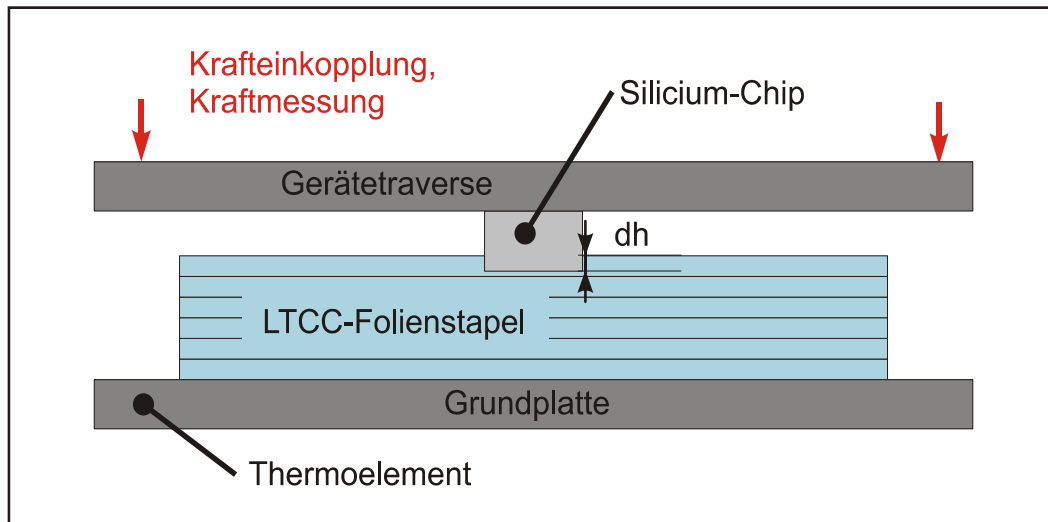


Abbildung 2-15: Schema der Versuchsanordnung im Flachsichtstauchversuch.

Der Stauchversuch wird mit einer Materialprüfmaschine /ZwickW/ gemäß der in Bild 2-15 dargestellten Anordnung durchgeführt. Ein Silicium-Chip mit einer Kantenlänge von $4 \cdot 4 \text{ mm}^2$ dient als Eindringkörper. Durch diese Wahl der Materialpaarung ist gewährleistet, dass die Oberflächenbedingungen denen bei der Umformung mit einem Siliciumwerkzeug entsprechen. Die Prüfchips werden mit einer Wafertrennsäge zugeschnitten. Dadurch wird eine Toleranz von $5 \mu\text{m}$ und besser erreicht, so dass die wirk-same Fläche eine hohe Genauigkeit hat.

Die Belastung mit einer Maximalkraft von 10 kN erfolgt bei konstanter Geschwindigkeit von 1 mm/min ohne Schmierung jeweils bei Raumtemperatur und 60°C . Da die Prüfmaschine nicht mit einer Heizoption ausgestattet ist, werden die Traverseplatten auf 70°C in einem Umluftofen vorgewärmt. Ein Thermoelement an der Bodenplatte der Anordnung kontrolliert den Istwert während der Messung, die Abweichung vom Sollwert beträgt maximal 3 K im gesamten Prüfzyklus.

Um die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens zu beurteilen, werden zunächst 5 Messungen mit DP951 durchgeführt und die Daten verglichen. Die Messkurven zeigen eine gute Wiederholgenauigkeit.

2.4.3 Aufbereitung der Messdaten

Die Kraftmessung erfolgt bei der verwendeten Prüfmaschine nicht unmittelbar an der Traverse. Um den Einfluss der Maschinensteifigkeit zu kompensieren, wird deshalb eine Referenzkurven bei identischer Prüfanordnung ohne LTCC-Folien aufgenommen, deren Messdaten durch ein Polynom 2. Grades approximiert und die Bestimmungsgleichung anschließend zur Korrektur der Messkurven genutzt.

Die Kraft-Weg-Messdaten liegen als Spannungs-Dehnungs-Kurven in der Form $\sigma_Z = f(\varepsilon)$ vor. Dabei entspricht die eingeprägte Spannung σ_Z laut Definition in Gleichung 1-33 dem Umformwiderstand k_w . Um die Messfunktion, wie in Bild 2-16

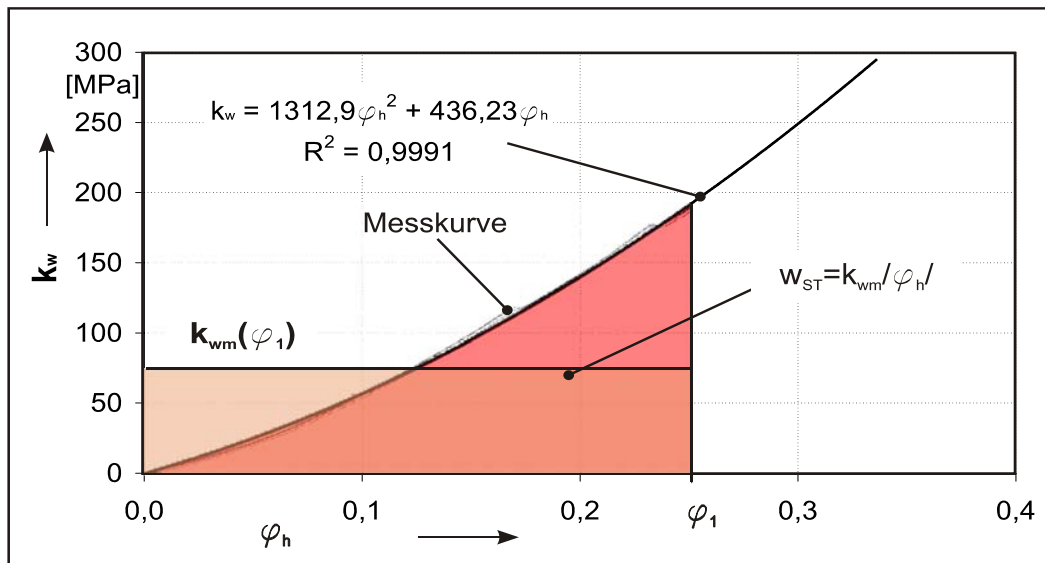


Bild 2-16: Bestimmung des mittleren Umformwiderstands k_{wm} aus der Messkurve für einen definierten Umformgrad φ_1 .

gezeigt, in der Form $k_w = f(\varphi)$ darzustellen, wird die technische Dehnung in den logarithmischen Umformgrad nach Gleichung 1-15 umgerechnet. Anschließend werden die Daten durch ein Polynom 2. Grades approximiert, welches die Berechnungsgrundlage für Staucharbeit und effektive Formänderungsarbeitsdichte bildet. Die Messdaten bis zu einer Dehnung von 40% sind durch eine Bestimmungsgleichung in folgender Form darstellbar:

$$k_w = a\varphi_h^2 + b\varphi_h \quad (\text{GL 2-1})$$

Die Koeffizienten a und b der Funktion $k_w(\varphi_h)$ in Gleichung 2-1 sind in Tabelle 2-6 für die untersuchten Grünfolien angegeben. Mit dieser Beziehung zwischen der wirksamen Spannung und dem Umformgrad folgt durch Integration von Gleichung 1-28 die Staucharbeit:

$$W_{St} = V_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} k_w(\varphi) d\varphi \quad (\text{GL 2-2})$$

Tabelle 2-6: Experimentell ermittelte Koeffizienten für die Funktion $k_w = f(\varphi)$.

Material	Temperatur	Koeffizient a	Koeffizient b	Bestimmtheitsgrad
951	25	1664	780	0,9985
951	70	1314	436	0,9991
CT 700	25	1927	370	0,9983
CT 700	70	1662	259	0,9983
BGK	25	1976	292	0,9995
BGK	70	1583	220	0,9993

Das Ausgangsvolumen V_0 berechnet sich aus der Grundfläche A_0 des Silicium-Chips und der Stapelhöhe h_0 der Folien. Die Division durch V_0 ergibt die spezifische Staucharbeit w_{St} unter Verwendung der approximierten Funktion in Gleichung 2-1:

$$w_{St} = \int_0^{\varphi_1} (a\varphi^2 + b\varphi) d\varphi \quad (GL\ 2-3)$$

Durch Integration in den Grenzen der jeweiligen Umformstufe erhält man die Bestimmungsgleichung:

$$w_{St} = \left. \frac{a}{3}\varphi^3 + \frac{b}{2}\varphi^2 \right|_0^{\varphi_1} \quad (GL\ 2-4)$$

Die nach Gleichung 2-4 errechneten Werte für die spezifische Staucharbeit sind in Abhängigkeit vom Umformgrad in den Diagrammen Bild 2-20 bis Bild 2-22 aufgetragen. Für einen definierten Umformprozess kann der mittlere Umformwiderstand k_{wm} aus den Messkurven berechnet werden:

$$w_{St} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} k_w d\varphi = k_{wm} |\varphi_h| \quad (GL\ 2-5)$$

$$k_{wm} = \frac{w_{St}}{|\varphi_h|}$$

Zur Veranschaulichung ist die Methode in Bild 2-16 dargestellt. Für einige definierte Umformgrade sind die mittleren Umformwiderstände in Tabelle 2-7 tabelliert.

2.4.4 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführte Messung erfasst neben elastischen und plastischen Dehnungen auch den Verdichtungsanteil. Die Diagramme in Bild 2-17 bis Bild 2-19 zeigen die ermittelten Kurven $k_w = f(\varphi)$ für DP951, CT700 und BGK. Alle Messkurven können mit hoher Genauigkeit durch eine quadratische Funktion approximiert werden (s. Tabelle 2-6), sie unterscheiden sich in ihrem Anstieg. Im Kurvenverlauf sind Unstetigkeitsstellen zu beobachten, an denen die Dehnung sprunghaft anwächst. Erklärbar ist das Verhalten

Tabelle 2-7: Mittlerer Umformwiderstand von LTCC-Grünfolien für ausgewählte Umformstufen bei 60°C.

Material	k_{wm} [MPa]		k_{wm} [MPa]		k_{wm} [MPa]	
	$\varphi_h=0,1$	$\varepsilon_h=10\%$	$\varphi_h=0,2$	$\varepsilon_h=22\%$	$\varphi_h=0,3$	$\varepsilon_h=35\%$
DP951	26		62		105	
CT700	19		48		88	
BGK	16		44		81	

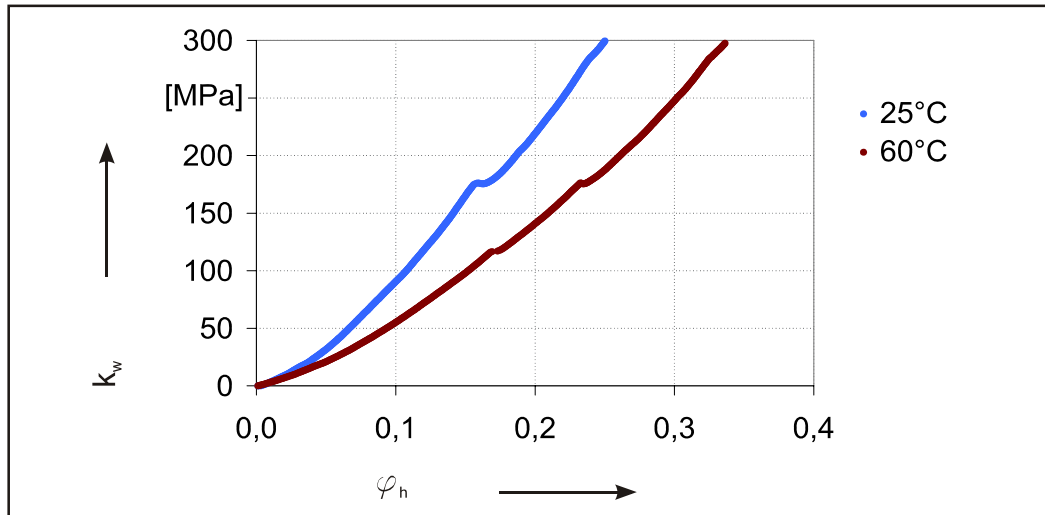


Bild 2-17: Umformwiderstand, ermittelt im Flachsichtstauchversuch DP951 bei Raumtemperatur und 60°C.

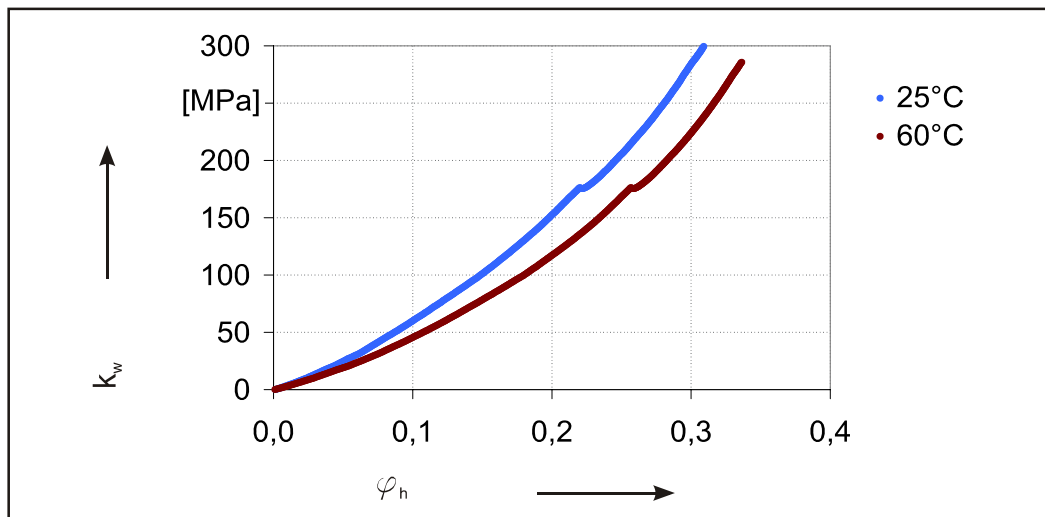


Bild 2-18: Umformwiderstand, ermittelt im Flachsichtstauchversuch CT700 bei Raumtemperatur und 60°C.

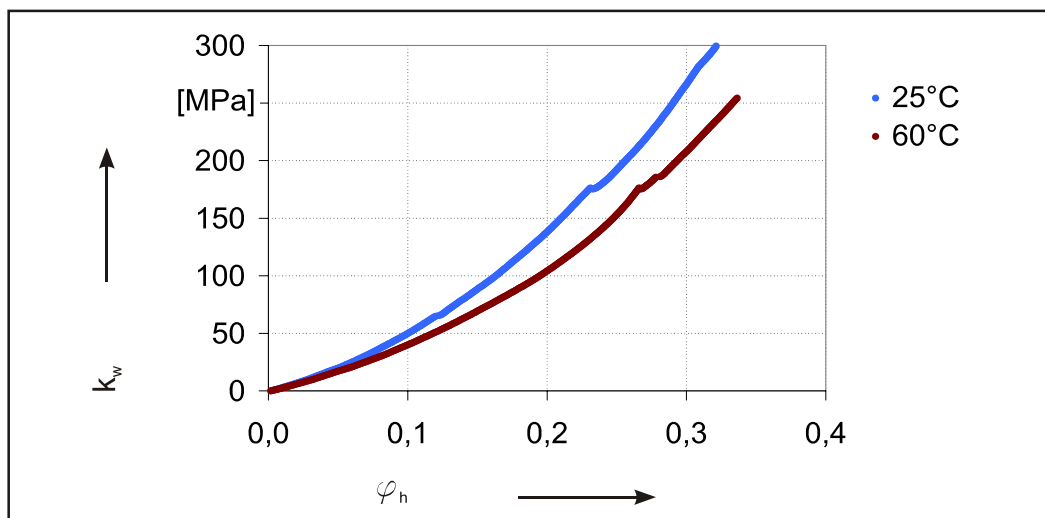


Bild 2-19: Umformwiderstand, ermittelt im Flachsichtstauchversuch BGK bei Raumtemperatur und 60°C.

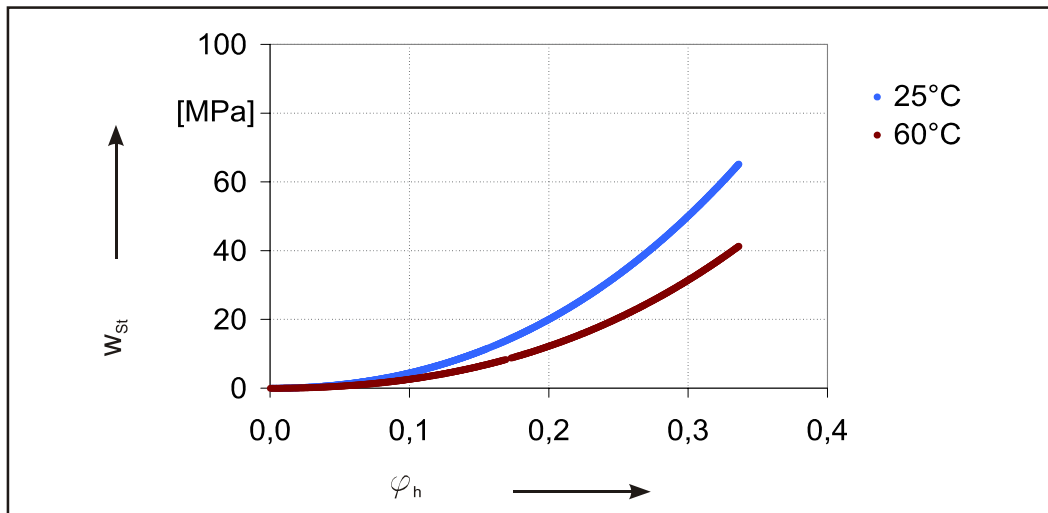


Bild 2-20: Spezifische Staucharbeit für das Material DP951 bei Raumtemperatur und 60°C.

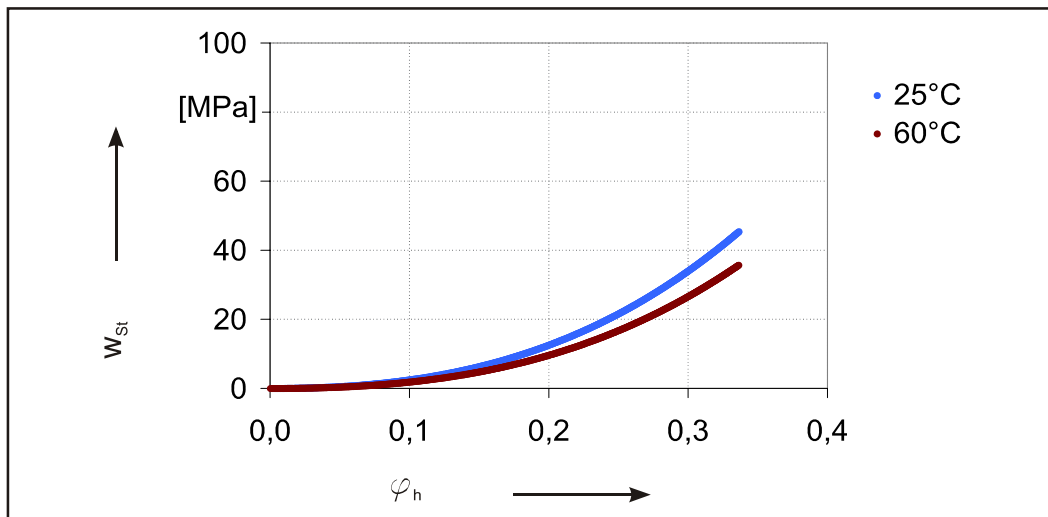


Bild 2-21: Spezifische Staucharbeit für das Material CT700 bei Raumtemperatur und 60°C.

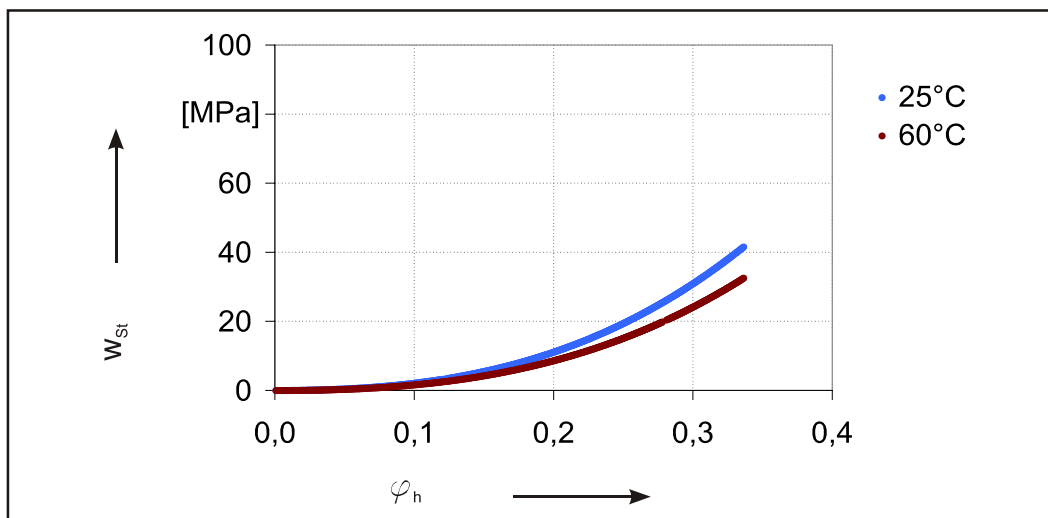


Bild 2-22: Spezifische Staucharbeit für das Material BGK bei Raumtemperatur und 60°C.

durch ruckartiges Versagen der Adhäsionskräfte bei definierten Druckspannungen und eine damit verbundene Umordnung des Haufwerkes, welches eine plastische Verformung bewirkt. Anordnungen mit ähnlichem Umformwiderstand (s. Gleichung 1-34) verhalten sich ähnlich. Da die Spannungen zum signifikanten Deformieren der Folien ähnlich sind (s. Bild 2-12), ist das Auftreten der Unstetigkeiten bei vergleichbaren Druckbelastungen um 170 MPa plausibel. Die Dehnungszuwächse unterscheiden sich. Das Material DP951 weist bei 60°C Prüftemperatur abweichend von den Vergleichsfolien bereits bei einer Spannung von ca. 120 MPa eine solche Unstetigkeitsstelle auf. Die Abweichung ist durch die geringeren Bindungskräfte der Folie erklärbar (s. Abschnitt 2.3.2).

Die spezifische Staucharbeit w_{ST} dient der Abschätzung des Kraftbedarfs und ist in Abhängigkeit vom Umformgrad in Bild 2-20 bis Bild 2-22 dargestellt. Das Material DP951 zeigt die größte Temperaturabhängigkeit. Nach Gleichung 2-5 wird der mittlere Umformwiderstand berechnet und die Werte für drei definierte Umformgrade in Tabelle 2-7 angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass DP951 den größten Umformwiderstand aufweist und somit den höchsten Kraftbedarf beim Stauchen hat. Die Umformwiderstände von BGK und CT700 unterscheiden sich nur geringfügig, BGK ist mit weniger Kraftaufwand stauchbar.

Die ermittelten Werte sind nur für ähnliche Umformsituationen gültig. Für abweichende Bedingungen müssen weitere Richtwerte bestimmt werden. Ist die genaue Kurve des Umformwiderstandes für eine Umformsituation nicht bekannt, kann näherungsweise ein linearer Verlauf angenommen werden und wie aus Bild 2-16 deutlich wird gilt dann:

$$k_w \approx 2k_{wm} \quad (\text{GL 2-6})$$

Unter Verwendung von Gleichung 1-33 kann damit die erforderlichen Stauchkraft F_{St} auch bei unbekanntem Kurvenverlauf bei gegebener Projektionsfläche A_d des Eindringkörpers abgeschätzt werden:

$$F_{St} = 2k_{wm} \cdot A_d \quad (\text{GL 2-7})$$

Mit den ermittelten Werkstoffdaten ist eine Basis zur Dimensionierung des erforderlichen Prägedruckes für die Anordnung gegeben. Bei Übertragung auf andere Umformgeometrien ist der geänderte Umformwiderstand zu berücksichtigen.

2.5 Verdichtung, plastische Verformung und Schwindung

2.5.1 Versuchsziel

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Abschnitt 2.3.2 und Abschnitt 2.4.4 ergibt sich dem Verhalten von DP951 ein Widerspruch. Im Vergleich zu den beiden anderen

Folien herrschen einerseits geringe Bindungskräfte bei Scherbelastung, andererseits ist ein hoher Kraftbedarf beim Stauchen erforderlich. Eine Erklärung kann aus der Feststoffmorphologie (s. Abschnitt 2.2) abgeleitet werden. Die dichte Packung der Pulverteilchen in der DP951-Folie bedingt eine verminderte Verdichtbarkeit, deshalb wird das Material bei Druckbelastung verdrängt. Damit verbunden sind im Vergleich zu besser verdichtbaren Folien stärkere Reibungsverluste. Da aus den bisherigen Betrachtungen die Anteile von Verdichtung und plastischer Verformung nicht separierbar sind, werden sie hier anhand definierter Umformstufen experimentell untersucht. Bei definierten Druckstufen sind die plastische Verformung und die Kompressibilität der Grünfolien sowie die Schwindung in den verschiedenen Körperrichtungen zur Beurteilung der Materialumordnung herauszuarbeiten.

Die Untersuchungen erfolgen an LTCC-Folienstreifen der in Abschnitt 2.1 ausgewählten Materialien bei Drücken bis 120MPa. Nach jedem Prozessschritt werden die technischen Dehnungen, Formänderungen und Verdichtungen als Funktion der Druckstufe ermittelt (s. Abschnitt 1.4.3). Die Dimensionsänderungen lassen Rückschlüsse auf den Anteil der plastischen Deformation und Verdichtung zu (s. Abschnitt 1.4.6). Zusätzlich wird die Dichte der gesinterten Proben bestimmt, um Auswirkungen hoher Verdichtung auf die Endporosität der gesinterten Keramik festzustellen.

2.5.2 Versuchsdurchführung

Die Probekörper werden aus Einzelfolienlagen mit Außenabmessungen von $31 \cdot 31$ mm zu einer Höhe von ca. 1 mm gestapelt. Bild 2-23 zeigt eine Skizze. Die Trocknung aller Proben erfolgt für 10 min im Umluftofen bei 80°C. Beim Stapeln wird die Ziehrichtungen der Einzellagen Lage zu Lage jeweils um 90° gedreht, um laterale Anisotropien auszugleichen. In Abhängigkeit von der verfügbaren Foliendicke variiert die Höhe der Folienstapel je nach Material um $\pm 0,05$ mm.

Gestanzte Abstandsmarken dienen zur Vermessung der Probekörpergeometrie. Die Stapeldicke wird mit einer Messschraube gemessen, wobei der aus 5 Werten gebildete Mittelwert \bar{Z} zur Auswertung kommt. Länge und Breite werden aus den Koordinaten (x_i, y_i) der Positionsvias berechnet, welche mit einem Koordinatenmessgerät /UHL/ bestimmt werden. In x- bzw. y-Richtung erfolgt die Mittelwertbildung für \bar{X} bzw. \bar{Y} anhand von zwei Messstrecken. Die Richtungen sind willkürlich festgelegt und werden vor der ersten Messung gekennzeichnet. Folgemessungen nach den einzelnen Prozessschritten erfolgen entsprechend dieser Kennzeichnung.

Die Positionsmarkenabstände in x, y und z-Richtung der unverdichteten Probekörper erhalten den Index '0', sie werden also X_0 , Y_0 und Z_0 benannt.

Die Verdichtung der Probekörper erfolgt in einer uniaxialen Presse /Weber/ mit unterschiedlichen Prägedrücken bei von 60°C für 4·2 min. Nach jeweils 2 min wird der Pro-

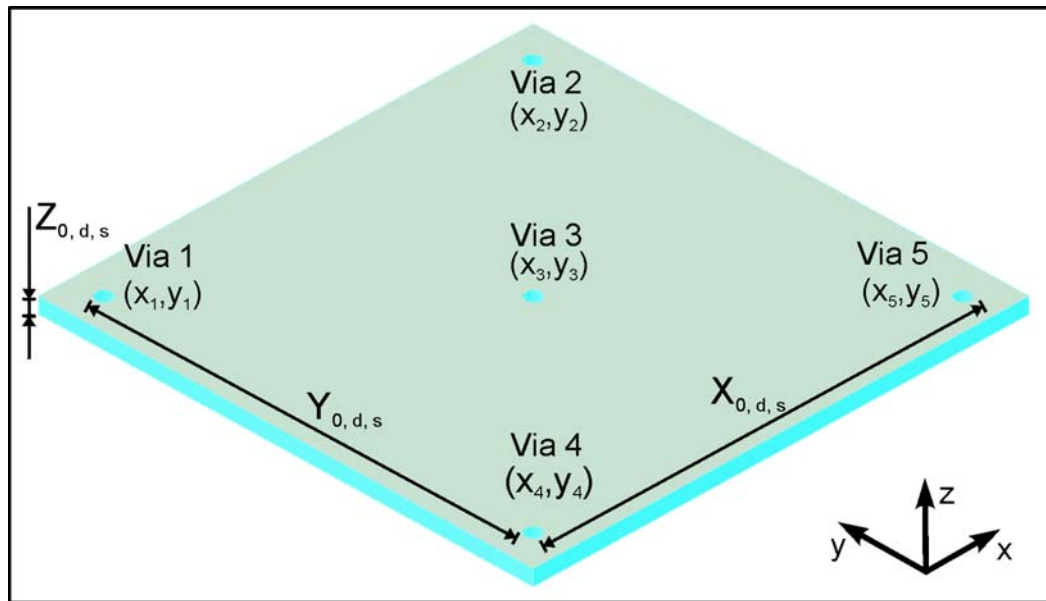


Bild 2-23: Probekörper zur Ermittlung der Abmessungsänderungen und der Verdichtung in Abhängigkeit von der Umformstufe.

Probekörper zum Ausgleich von Parallelitätstoleranzen um 90° in der Presse gedreht. Nach dem Verdichten werden die Positionsmarkenabstände, nun benannt mit dem Index 'd', erneut vermessen. Das anschließende Sintern erfolgt im Laborofen /Nabertherm/ mit einem Standardprofil (s. Abschnitt A 1.2 bis Abschnitt A 1.4). Die Strecken X_s , Y_s und Z_s bezeichnen die Positionsmarkenabstände der gesinterten Probekörper.

Die Dichte der gesinterten Proben wird volumetrisch im Gaspyknometer /AccuPyc/ mit Helium als Messgas ermittelt. Sie werden dazu in grobe Stücke von ca. 1-2 mm Kantenlänge zerstoßen und unbehandelt zur Messung eingesetzt. Für jeden Messwert erfolgt die Mittelung von 15 Einzelmessungen, die daraus resultierende Dichte ρ_s ist für alle Grünfolien in Bild 2-35 aufgetragen.

2.5.3 Aufbereitung der Messdaten

Abmessungsänderungen

Die resultierende Abmessungsänderung (technische Dehnung) wird aus den Messungen vor und nach Verdichtung für jede Druckstufe gemäß Gleichung 1-11 berechnet. Im einzelnen ergibt sich aus den Messwerten:

$$\varepsilon_l = \frac{\overline{X_d} - \overline{X_0}}{\overline{X_0}} \quad \varepsilon_b = \frac{\overline{Y_d} - \overline{Y_0}}{\overline{Y_0}} \quad \varepsilon_h = \frac{\overline{Z_d} - \overline{Z_0}}{\overline{Z_0}} \quad (\text{GL 2-8})$$

Die Ergebnisse sind in Bild 2-24 bis Bild 2-29 über dem Prägedruck aufgetragen.

Analog zu den Abmessungsänderungen beim Verdichtungsschritt werden die Abmessungsänderungen vom gesinterten Zustand bezogen auf den unverdichteten Zustand

nach Gleichung 1-37 und die Schwindung beim Sintern nach Gleichung 1-39 bestimmt. Es gilt für jede Druckstufe:

$$s_l = \frac{\overline{X_s} - \overline{X_d}}{\overline{X_d}} \quad s_b = \frac{\overline{Y_s} - \overline{Y_d}}{\overline{Y_d}} \quad s_h = \frac{\overline{Z_s} - \overline{Z_d}}{\overline{Z_d}} \quad (\text{GL 2-9})$$

und

$$u_l = \frac{\overline{X_s} - \overline{X_0}}{\overline{X_0}} \quad u_b = \frac{\overline{Y_s} - \overline{Y_0}}{\overline{Y_0}} \quad u_h = \frac{\overline{Z_s} - \overline{Z_0}}{\overline{Z_0}} \quad (\text{GL 2-10})$$

Auch diese Ergebnisse sind in Bild 2-24 bis Bild 2-29 dargestellt.

Umformgrad und Verdichtungsgrad

Die globalen Umformgrade des Probekörpers werden gemäß Gleichung 1-14 für die jeweilige Druckstufe wie folgt berechnet:

$$\varphi_l = \ln \frac{\overline{X_d}}{\overline{X_0}} \quad \varphi_b = \ln \frac{\overline{Y_d}}{\overline{Y_0}} \quad \varphi_h = \ln \frac{\overline{Z_d}}{\overline{Z_0}} \quad (\text{GL 2-11})$$

Aus den Werten können unter Verwendung von Gleichung 1-24 und Gleichung 1-27 Verdichtungs- und Umformgrad in Z-Richtung ermittelt werden:

$$\varphi_h^{\text{PL}} = -\varphi_l - \varphi_b \quad \varphi_h^{\text{VD}} = \varphi_h - \varphi_h^{\text{PL}} \quad (\text{GL 2-12})$$

Die Ergebnisse sind in Bild 2-30 bis Bild 2-32 in Abhängigkeit vom Prägedruck der Umformstufe dargestellt.

Spezifische Umformarbeit und Verdichtung

Die plastischen Anteile w_{PL} und Verdichtungsanteile w_{VD} an der spezifischen Deformationsarbeit werden nach Gleichung 1-35 und Gleichung 1-36 berechnet. Da der Druckverlauf beim durchgeführten Versuch nicht bekannt ist, werden die spezifischen Formänderungsarbeiten unter Verwendung des mittleren Umformwiderstandes k_{wm} , definiert in Gleichung 2-5, für die entsprechenden Umformstufen abgeschätzt. Sein Wert entspricht gemäß Gleichung 2-6 unter Annahme eines linearen Kurvenverlaufs und bei Vernachlässigung von Reibung und elastischer Deformation ungefähr dem halben Prägedruck p_p . Es gilt:

$$w_{\text{PL}} = k_{\text{wm}} \cdot \varphi_h^{\text{PL}} \quad \text{mit} \quad k_{\text{wm}} \approx \frac{p_p}{2} \quad (\text{GL 2-13})$$

$$w_{\text{VD}} = k_{\text{wm}} \cdot \varphi_h^{\text{VD}}$$

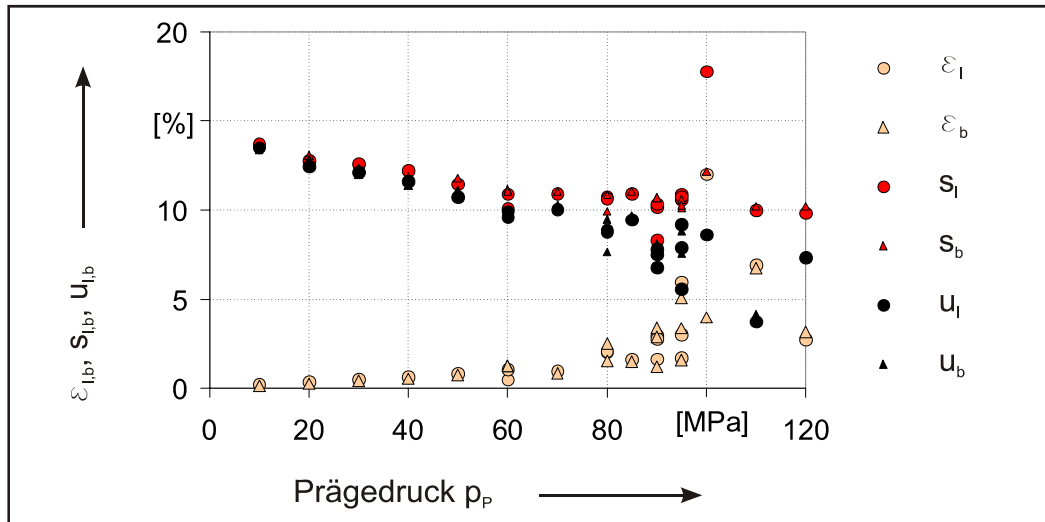


Bild 2-24: Technische Dehnungen (horizontal) als Funktion des Druckes für verschiedenen Prozessschritte, Material DP951.

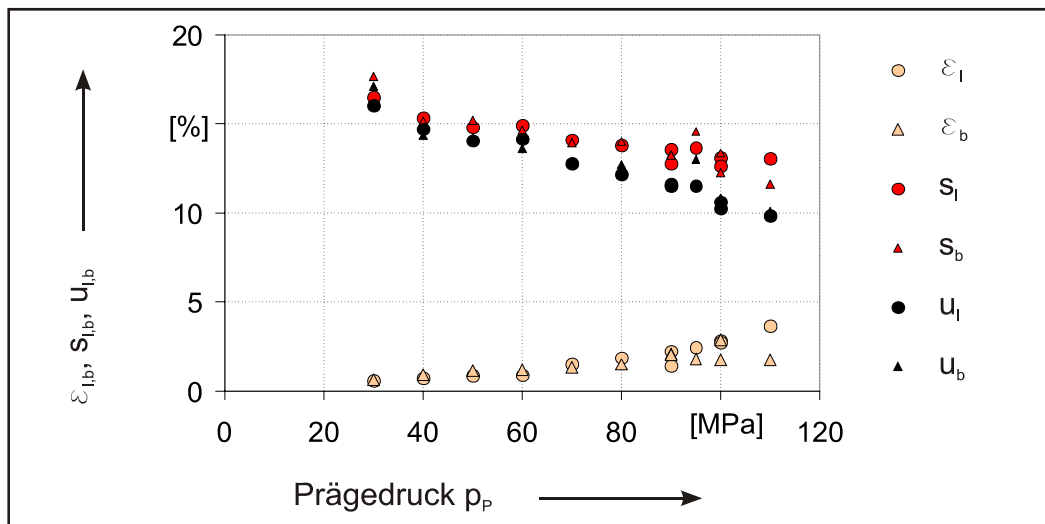


Bild 2-25: Technische Dehnungen (horizontal) als Funktion des Druckes für verschiedenen Prozessschritte, Material CT700.

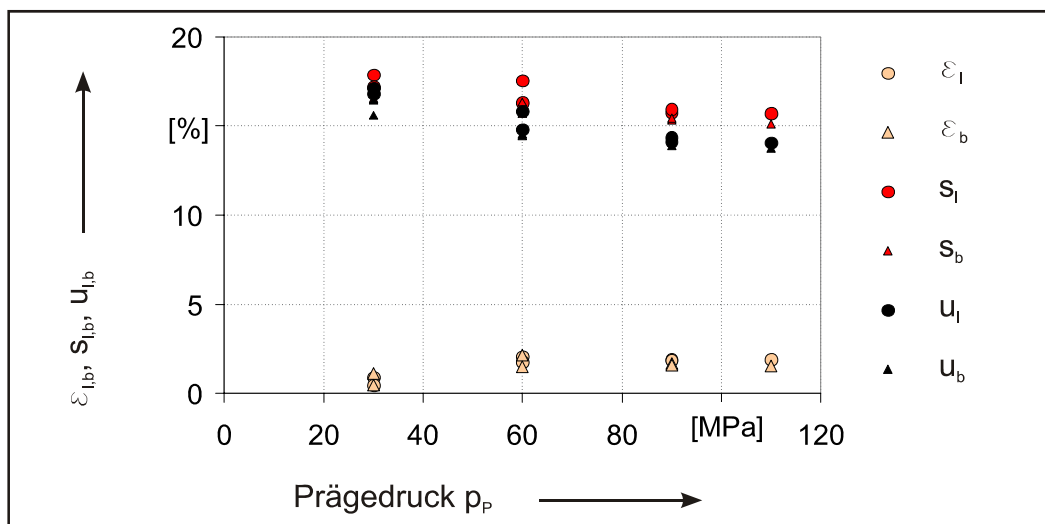


Bild 2-26: Technische Dehnungen (horizontal) als Funktion des Druckes für verschiedenen Prozessschritte, Material BGK.

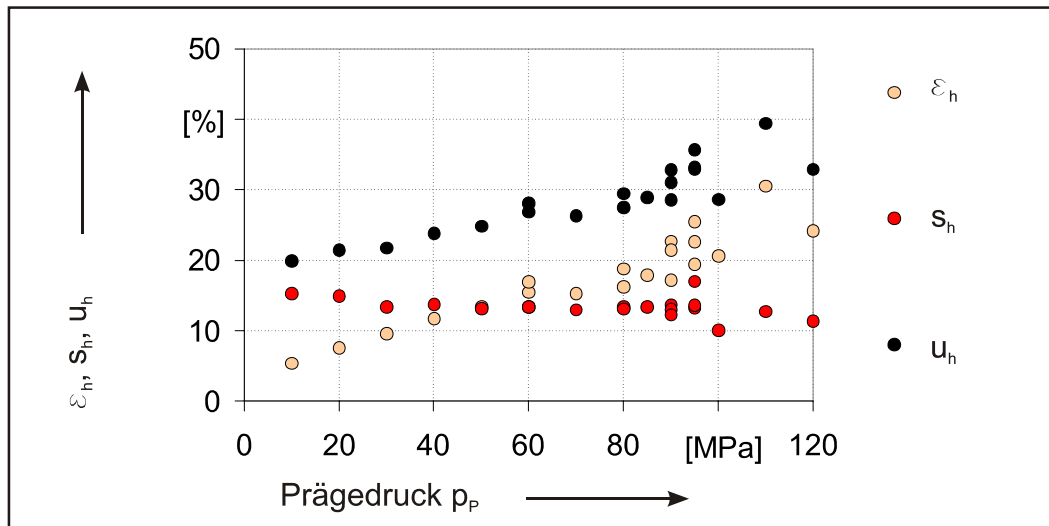


Abbildung 2-27: Technische Dehnung in z-Richtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material DP951.

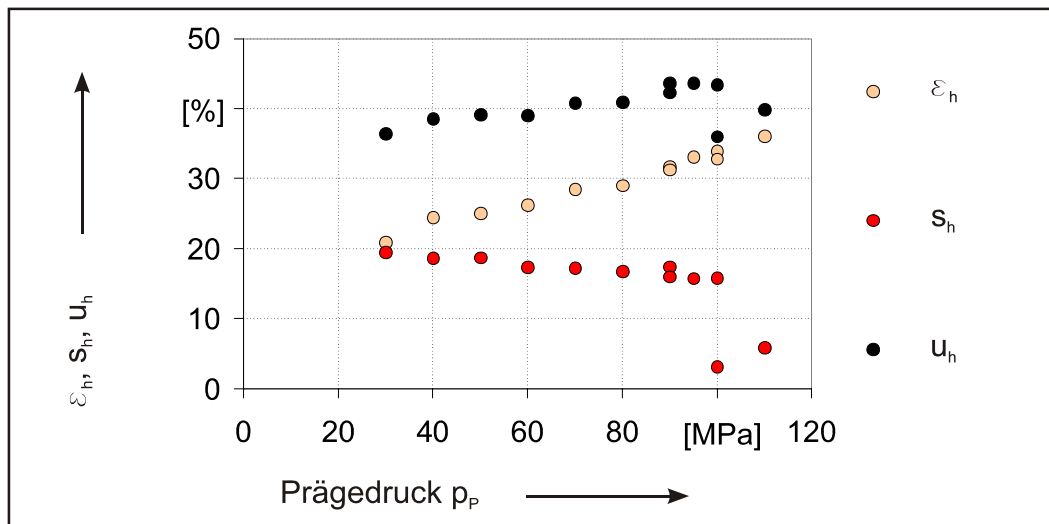


Abbildung 2-28: Technische Dehnung in z-Richtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material CT700.

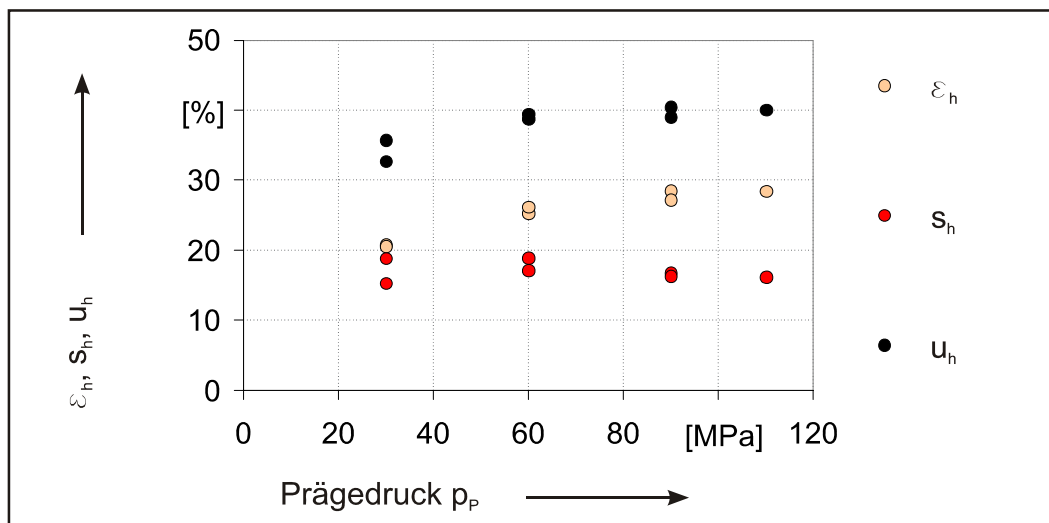


Abbildung 2-29: Technische Dehnung in z-Richtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material BGK.

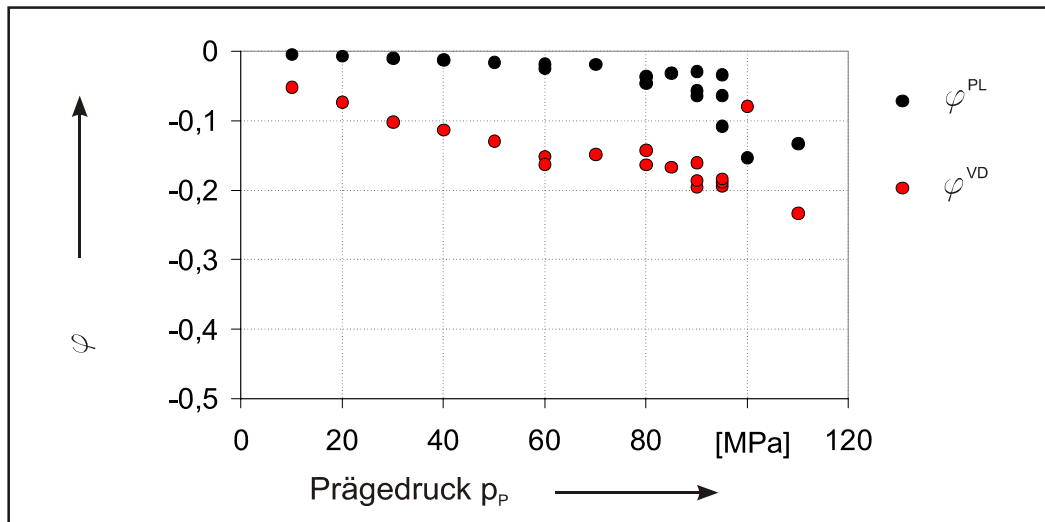


Bild 2-30: Anteile der plastischen Deformation und der Verdichtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material DP951.

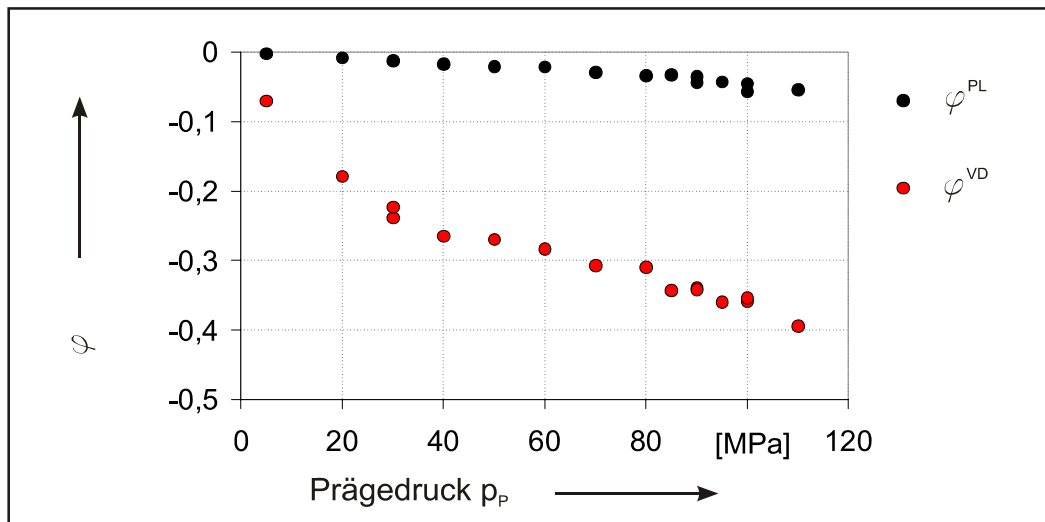


Bild 2-31: Anteile der plastischen Deformation und der Verdichtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material CT700.

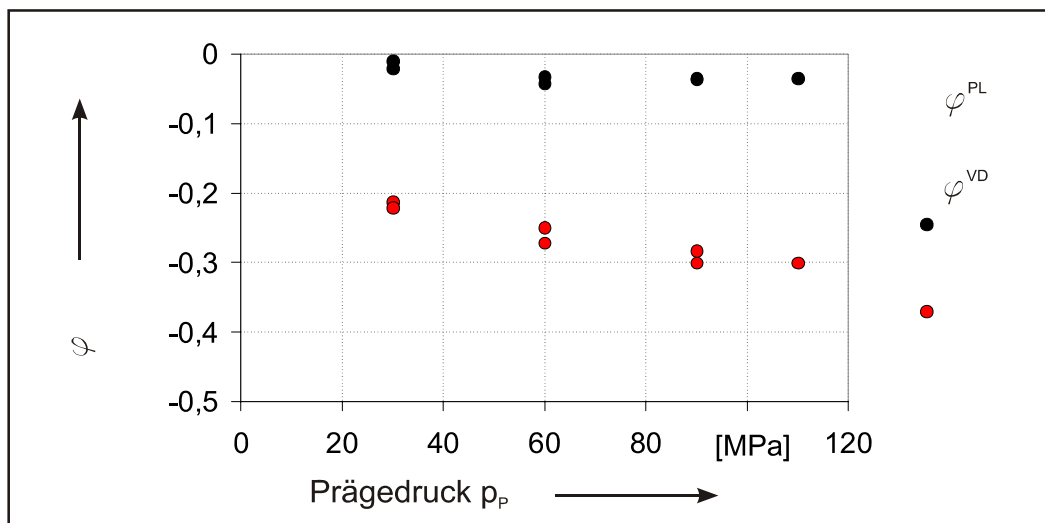


Bild 2-32: Anteile der plastischen Deformation und der Verdichtung in Abhängigkeit vom Prägedruck für das Material BGK.

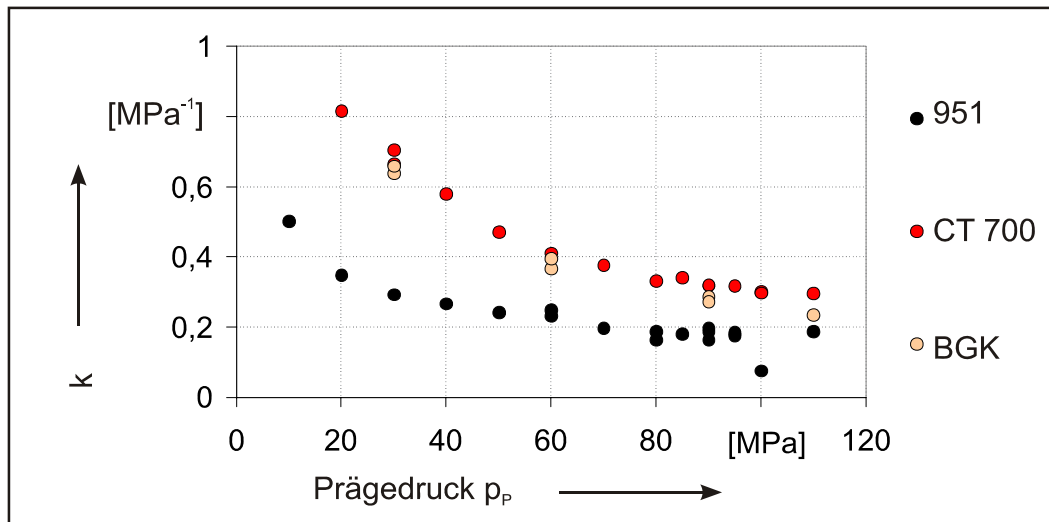


Bild 2-33: Vergleich der Kompressibilitäten der betrachteten Grünfolien in Abhängigkeit vom Prägedruck.

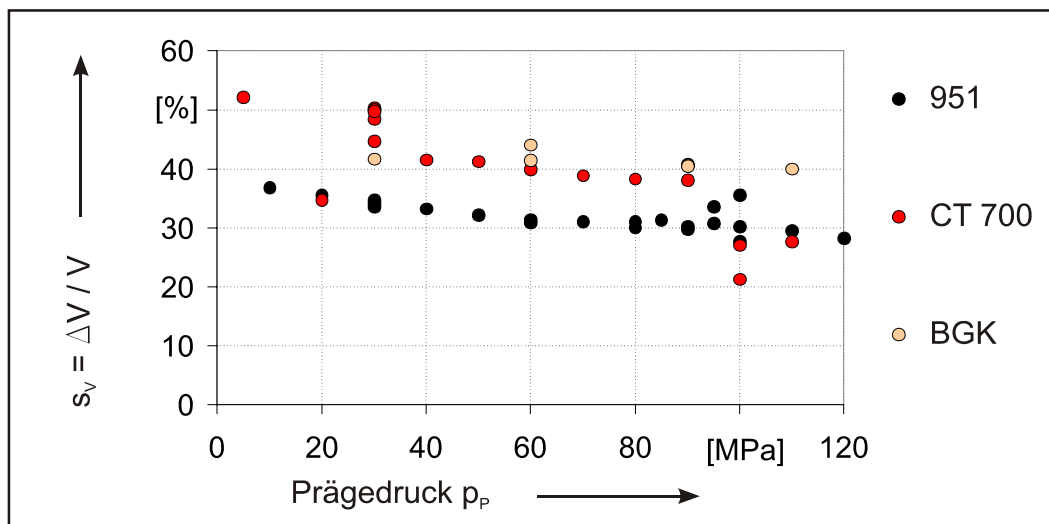


Bild 2-34: Vergleich der Volumenschwindungen der betrachteten Grünfolien als Funktion des Prägedruckes.

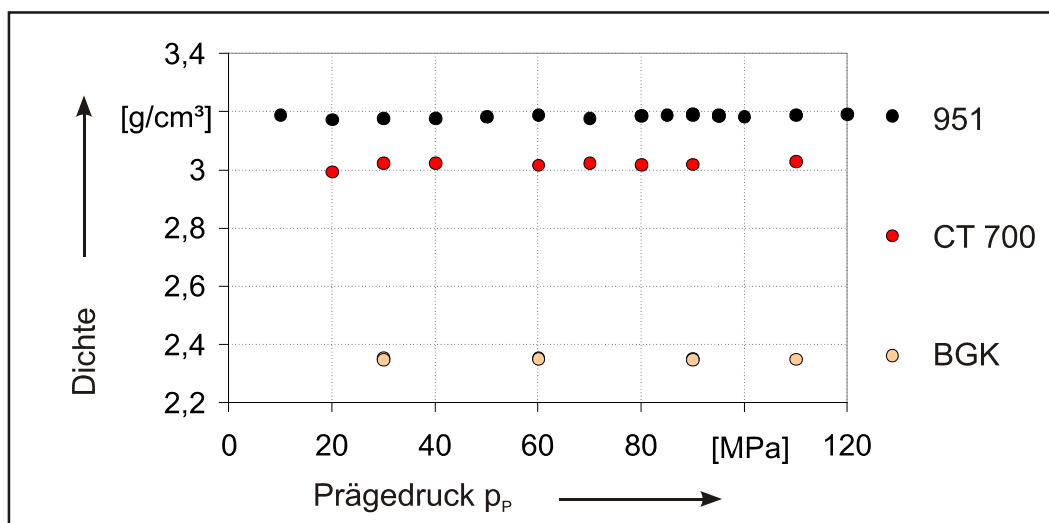


Bild 2-35: Sinterdichten der LTCC-Materialien als Funktion des Prägedruckes im Vergleich.

Tabelle 2-8: Spezifische Deformationsarbeiten von LTCC-Grünfolien, plastischer Anteil der Formänderung und Verdichtungsanteil bei ausgewählten Druckstufen.

Material	$w_{PL@30}$ [MPa]	$w_{VD@30}$ [MPa]	$w_{PL@60}$ [MPa]	$w_{VD@60}$ [MPa]	$w_{PL@100}$ [MPa]	$w_{VD@100}$ [MPa]
DP951	0,1	1,5	0,7	4,9	4,2	9,9
CT700	0,2	3,3	0,6	8,5	2,8	17,9
BGK	0,1	3,3	1,0	8,1	1,9	16,5

Auf diese Weise können die Anteile von Formänderung und Verdichtung an der spezifischen Deformationsarbeit aus den Umform- und Verdichtungsgraden berechnet werden. Konkrete Werte sind für Prägedrucke von 30 MPa, 60 MPa und 100 MPa in Tabelle 2-8 angegeben. Ein plastischer Verformungsanteil von über 1 % wird von allen Materialien erst bei einem Druck von 100 MPa erreicht. Der höchste plastische Verformungsanteil ist bei DP951 gegeben.

Kompressibilität und Volumenverdichtung

Aus den Mittelwerten vor der Verdichtung \bar{X}_0 , \bar{Y}_0 , \bar{Z}_0 und nach der Verdichtung \bar{X}_d , \bar{Y}_d , \bar{Z}_d wird die Volumenkompression bestimmt:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{(\bar{X}_d - \bar{X}_0)(\bar{Y}_d - \bar{Y}_0)(\bar{Z}_d - \bar{Z}_0)}{\bar{X}_0 \bar{Y}_0 \bar{Z}_0 \cdot \Delta p} \quad (\text{GL 2-14})$$

Sie dient zur Berechnung der Kompressibilität k der Grünfolien nach Gleichung 1-20. Bild 2-33 stellt die Werte aller Folien im Vergleich dar, Parameter ist der uniaxial aufgebrachte Prägedruck.

Die Volumenschwindung wird analog unter Verwendung der Messwerte nach Verdichtung und Sintern berechnet:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{(\bar{X}_s - \bar{X}_d)(\bar{Y}_s - \bar{Y}_d)(\bar{Z}_s - \bar{Z}_d)}{\bar{X}_d \bar{Y}_d \bar{Z}_d} \cdot 100\% \quad (\text{GL 2-15})$$

Diese Schwindungswerte sind in Bild 2-34 für die drei LTCC-Materialien zusammengefasst. Bild 2-35 zeigt die gemessene Sinterdichte der untersuchten LTCC-Keramiken in Diagrammform.

2.5.4 Diskussion der Ergebnisse

Abmessungsänderungen

Aus dem Vergleich von Bild 2-24 bis Bild 2-26 folgt, dass das Material DP951 sich in horizontaler Richtung am stärksten aufweitet. Ab Drücken von 100 MPa werden Deh-

nungen um 5 % erreicht. Die Schwindung sinkt bei allen Grünfolien erwartungsgemäß mit steigendem Prägedruck, die Abhängigkeit der Längenänderungen $u_{l,b}$ nach dem Sintern bezogen auf die Ausgangsmaße machen deutlich, dass tatsächlich eine Umordnung von Material stattfindet.

Die beim Prägen erreichte Höhenreduktion wird während des Sinterns teilweise kompensiert, wie aus den Darstellungen in Bild 2-27 bis Bild 2-29 ersichtlich ist. Besonders stark ist der Effekt bei CT700 und BGK zu beobachten, was auf einen hohen Verdichtungsanteil an der Deformation dieser Folien hinweist. DP951 zeigt die größte bleibende Formänderung nach dem Sintern.

Plastische Verformung und Verdichtung

Die Betrachtung der Formänderungen in Bild 2-30 bis Bild 2-32 bestätigt die Annahme eines hohen Verdichtungsanteils an der Deformation. Bei allen drei Materialien ist der Verdichtungsgrad im gesamten Prägedruckbereich größer als der Umformgrad. Die höchste plastische Verformung tritt beim Stauchen von DP951 ab Prägedrücken von 60 MPa auf. Aus dem Vergleich der Werte in Tabelle 2-8 folgt, dass das Verhältnis von spezifischer Formänderungsarbeit und Verdichtungsarbeit bei diesem Material am günstigsten ausfällt.

Verdichtungsverhalten

Alle Messkurven der Kompressibilität in Bild 2-33 zeigen qualitativ einen ähnlichen Verlauf. Während BGK und CT700 sich auch quantitativ ähnlich verhalten, ist DP951 weniger verdichtbar. Dieses Verhalten ist durch die Feststoffmorphologie (Abschnitt 2.2) erklärbar. Aus der Größenverteilung Pulverpartikel ergibt sich ein geringer Binderanteil, die Pulverteilchen sind bereits ohne äußeren Druck dichter gepackt als bei den beiden Vergleichsfolien. Ein Plateauwert der Verdichtung stellt sich für alle betrachteten Materialien oberhalb von 80 MPa ein.

Die Volumenschwindung der Folien BGK und CT700 beim Sintern beträgt etwa 40 %. Auch hier zeigt sich, dass die DP951-Folie eine Sonderrolle einnimmt. Die geringe Volumenreduktion von ca. 30 % beim Sintern wirkt sich günstig auf Schwindungstoleranzen aus. Eine signifikante Abhängigkeit der Volumenschwindung vom Prägedruck ist bei keiner Folie erkennbar.

Der Vergleich der Dichtewerte in Bild 2-35 zeigt, dass auch bei hohen Prägedrücken die Enddichte des gesinterten Verbundwerkstoffes nicht signifikant beeinflusst wird. Die Porosität der gebrannten Keramik wird nicht durch die Verdichtung im Grünzustand beeinflusst, sondern ausschließlich durch den Sinterprozess bestimmt.

2.6 Zusammenfassung der Materialeigenschaften

2.6.1 DP951

Der Pulveranteil der Grünfolie teilt sich in eine gröbere und eine feinere Partikelfraktion auf. Dadurch wird eine dichtere Packung der Feststoffe erreicht, die eine geringe Schwindung sowie eine hohe innere Reibung bewirkt. Bis 60°C hat die Temperatur einen großen Einfluss auf die innere Reibung, bei weiterer Temperaturerhöhung bleiben die viskoelastischen Moduln weitgehend konstant.

Unter Scherbelastung bei 60°C weist das Material die geringste Dehnbarkeit, NEWTONSCHE Viskosität und LVE-Grenzspannung unter den betrachteten Materialien auf. Die Elastizität ist vergleichbar mit der von CT700. Plastische Verformungen treten bereits bei Schubspannungen um 1 MPa auf.

Aufgrund der Feststoffverteilung ergibt sich eine geringe Kompressibilität des Materials. Damit verbunden sind ein hoher spezifischer Umformwiderstand sowie eine signifikante plastischer Verformung bei 60°C unter Druckbelastung um 100 MPa.

2.6.2 CT700

CT700 zeichnet sich durch eine hohe Scherfestigkeit bei 60°C aus. Damit verbunden ist eine hohe Fließspannung. Die NEWTONSCHE Viskosität ist im Vergleich zu DP951 gering und stark lastabhängig, die plastische Verformbarkeit gering.

Unter Druckbelastung wird das Material hauptsächlich verdichtet, der Anteil plastischer Verformungen ist gering. Spezifischer Umformwiderstand, Kompressibilität und Volumenschwindung sind mit BGK vergleichbar.

2.6.3 BGK

Bei Scherbelastung zeigt die BGK-Folie zähes Verhalten. Sie ist dehnbar, nachgiebig und hat die geringste Fließspannung im Test. Die NEWTONSCHE Viskosität ist geringer als die von CT700. Temperaturerhöhungen im Intervall bis 140°C bewirken eine Senkung der inneren Reibung.

Unter Druckbelastung bis 100 MPa findet hauptsächlich Verdichtung statt. Der plastische Anteil an der Verformung ist sehr gering. Spezifischer Umformwiderstand, Kompressibilität und Volumenschwindung sind mit CT700 vergleichbar.

3 FERTIGUNGSTECHNISCHE ASPEKTE

3.1 Einordnung der Arbeiten

Im Mittelpunkt dieses Abschnittes steht die Prozessführung beim Prägen und ihre fertigungstechnische Integration in LTCC-Prozessabläufe.

Ein bestimmender Qualitätsfaktor beim Einsatz von Replikationsverfahren ist die Verfügbarkeit geeigneter Formen. Die Fertigung mikrotechnischer Werkzeuge baut auf umfangreichen Erfahrung am Institut bei der Herstellung von Siliciumwerkzeugen auf. Diese Technologie wird hier zum besseren Verständnis beschrieben, ihre Entwicklung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Arbeitsgegenstand ist die Erprobung galvanisch in Nickel abgeformter Prägewerkzeuge und verschiedener Oberflächenmodifikationen.

Die Prägeprozessoptimierung erfolgt unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften (s. Kapitel 2). Methoden der statistischen Versuchsplanung kommen zum Einsatz, um bereits vorhandene Erfahrungen aus [ALB03] zu verifizieren und quantifizieren. Das Prägeergebnis wird als Funktion der Hauptprozessparameter quantitativ charakterisiert. Daraus werden Empfehlungen für eine optimale Prozessführung abgeleitet. Die Veröffentlichung der durchgeführten Arbeiten erfolgte in [BAR08e].

Ein wichtiger fertigungstechnischer Aspekt ist die dickschichtkompatible Folgeprozessierung geprägter Strukturen, bei der LTCC-Standardtechnologien verwendet werden sollen. Bild 3-1 zeigt einen LTCC-Prozessablauf mit eingegliedertem Prägeschritt. Vorzugsweise erfolgt das Prägen nach dem Stanzen und Füllen der Durchkontaktierungen (Vias). Die Strukturen werden im Prozessverlauf je nach Anwendung mit Funktionspasten gefüllt oder als Fluidstrukturen in das Gesamtsubstrat integriert. Um

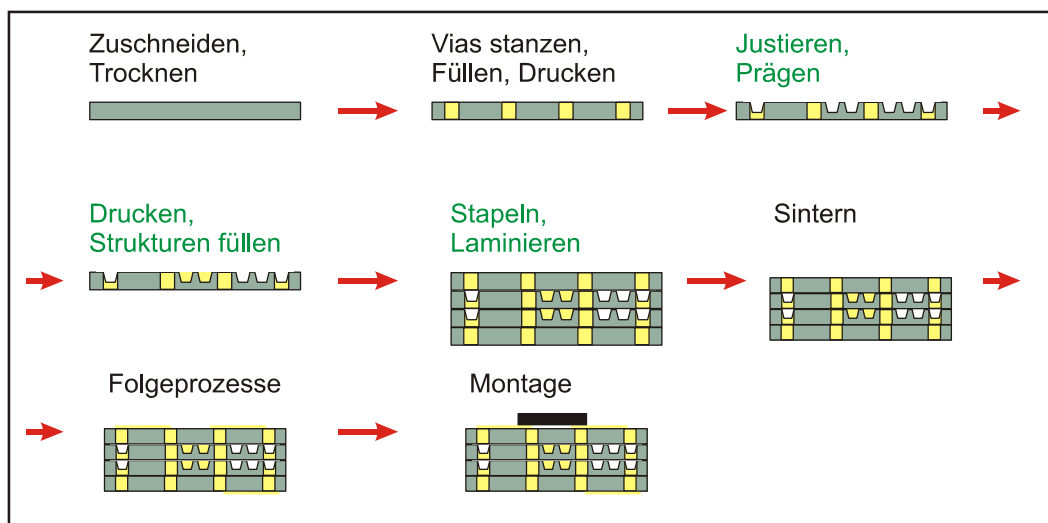


Bild 3-1: Eingliederung geprägter und funktionalisierter Folienlagen in die LTCC-Prozesskette.

Stapelfehler durch Langzeitrelaxation auszuschließen wird die Stabilität der Lagetoleranzen bei prozessüblicher Lagerung untersucht.

Weitere Aufgabenstellungen ergeben sich aus der Funktionalisierung von Prägestrukturen. Das Füllen geprägter Leiterbahnen mit Siebdruckpasten unter Nutzung verschiedener Technologien erfolgte in Gemeinschaftsarbeiten [PER09, MIK09]. Die Ergebnisse sind hier zusammengefasst. Bei Prozessierung fluidischer Strukturen muss sichergestellt sein, dass diese bei der Lamination nicht zusammengedrückt werden. Da die Prozessführung darauf abzielt, geprägte Grünfolien mit Standard-Sinterprozessen zu behandeln und Sonderlösungen zu vermeiden, soll die Verarbeitung möglichst ohne weitere Hilfsstoffe erfolgen. Ein Technologieansatz unter diesen Randbedingungen wird hier aufgezeigt. Die Ergebnisse sind in [BAR07a] veröffentlicht.

Die Verdichtung beim Prägen beeinflusst die Schwindung. Dies kann zu Deformationen an freitragenden Brücken führen, die zur thermisch entkoppelten Anordnung von Funktionselementen im Fluidstrom erforderlich sind. Die Spannungskompensation einer verdichteten, frei tragenden Struktur mit Hilfe statistischer Versuchsplanung wird gezeigt und damit ein Werkzeug zur Prozesskontrolle vorgestellt.

3.2 Werkzeugfertigung

3.2.1 Überblick

Die Entwicklung von Mikroreplikationswerkzeugen wird hauptsächlich von Spritzguß- und Druckumformverfahren voran getrieben, welche Zielmärkte mit großen Stückzahlen bedienen. Dabei umfasst die Kunststoffformung einen stetig steigenden Marktanteil. Vielfältige Mikrotechnologien zur Werkzeugfertigung sind verfügbar [GIB07]. Die in dieser Publikation angegebenen Spezifikationen fasst Tabelle 3-1 zusammen. Geeignete Technologien werden nach Stückzahl, verfahrensbedingter Belastung, erforderlicher Standzeit, zu formender Geometrie und erlaubten Toleranzen ausgewählt.

Metallische Werkzeuge zeichnen sich durch Langlebigkeit und Temperaturbelastbarkeit aus, können jedoch nur durch serielle Verfahren wie Feinbearbeitung, Mikroerosivbearbeitung und Laserablation direkt geformt werden. Die Präzision mikrotechnischer Verfahren wird durch galvanische Abformung eines Modells aus gut strukturierbaren Materialien, dem sogenannten Master, in belastbarere Metalle übertragen. Nickel kommt bevorzugt zum Einsatz, da es härter und abriebfester ist als Kupfer. Es stehen etablierte Prozesse bei verschiedenen Dienstleistern zur Verfügung, die eine qualitätsgerechte Galvanoformung gewährleisten [CDA09, TEM09].

Bei Herstellung des Modells durch klassische Mikrotechnologien, wie der lithographischen Strukturierung verschiedener Polymere oder Siliciumätzen, ist der Gestaltungsspielraum eingeschränkt, da Geometrien nur in der Ebene frei gestaltet werden können.

Tabelle 3-1: Mikrotechnische Verfahren zur Herstellung von Replikationswerkzeugen. FIB: fokussierte Elektronenstrahlbearbeitung; LIGA: Lithographie und galvanische Abformung; μ EDM: Mikroerosivbearbeitung, DRIE: reaktives Tiefenätzen.

Verfahren	2D/ 3D	Strukturgröße [μ m]		Aspekt- verhält- nis	Wand- rauheit [μ m]	Material
		typisch	Tole- ranz			
FIB	2+3D	0,2	0,02	k.A.	k.A.	beliebig
LIGA	2D	0,1-500	0,02-0,5	1-1000	k.A.	Cu, Ni
Feinbearbeitung	2+3D	25	2	10-50	~1	Stahl
μ EDM	2+3D	10-25	3	10-100	0,3-1	leitfähig
DRIE	2D	k.A.	<1	10-25	2	Si
UV-Dickresist	2D	k.A.	2-3	22	~1	k.A.
Laserablation	2+3D	6	<1	1-10	0,1-1	vielfältig

Um aufwendige Feinbearbeitung zu umgehen, kommen Sonderlösungen zum Einsatz. Die Erzeugung gekrümmter Strukturen in PMMA wird in [SHI08] vorgestellt. Ein mit Durchbrüchen versehenes Blech wird in den erwärmten Kunststoff gedrückt. Dabei formen sich Rundungen durch die Oberflächenspannung, welche dann galvanisch abgeformt werden. So wird ein Werkzeug zur Abformung runder Fluidkanäle erzeugt. Neben PMMA kommen thermisch stabilerer und belastbarer Kunststoffstoffe wie Parylene C in solchen Technologielösungen zum Einsatz [YOU07]. Der inerte und hydrophobe Charakter dieses Materials erleichtert das Ausformen der Replikat. Die Ansätze zeigen kostengünstige Alternativen der Erzeugung sphärischer Flächen zur mechanische Feinbearbeitung auf.

In der vorliegenden Arbeit werden für Funktionsnachweise und Anwendungsmuster in der Regel Siliciumwerkzeuge verwendet, da sie kostengünstig zur Verfügung stehen, nach kurzer Durchlaufzeit verfügbar sind und eine hohe Genauigkeit aufweisen. Langlebigere Werkzeuge für Serienfertigungen werden bei der Firma CDA GmbH galvanisch in Nickel abgeformt, wobei als Modell strukturierte Siliciumwafer und UV-Dickresist-Strukturen auf Glassubstraten dienen. Die angewandten Technologien werden zum besseren Verständnis kurz beschrieben.

3.2.2 Herstellungsprozess für Siliciumwerkzeuge

Beim DRIE-Verfahren (Deep Reactive Ion Etching) werden isotrope Ätzyklen, die durch einen physikalischen Anteil gerichteten Charakter haben, mit Passivierungssequenzen in einem Plasmaprozess kombiniert, um eine senkrechte Strukturierung von Siliciumwafern bis in große Tiefen zu erreichen. Das auch als Bosch-Prozess bekannte Verfahren wurde ursprünglich zum Mesa-Ätzen von Siliciumchips entwickelt [LÄR92, RIE09]. An der TU Ilmenau wird der unter dem Begriff ASE-Prozess (Advanced Silicon Etching) von der Firma Surface Technology Systems Plc. (STS) vermarktete Prozess eingesetzt. Er eignet sich zur Herstellung von Prägewerkzeugen und Masterstrukturen in Silicium, hat jedoch zwei wesentliche Nachteile: Sowohl die durch die Prozesssequenzen erzeugte typische Rillenstruktur als auch der senkrechte Kantenverlauf erschweren die Ausformung des Prägeteils. Um diese Nachteile zu umgehen, wird nach dem Trockenätzprozess ein exothermer, schnell ablaufender Polierätzpro-

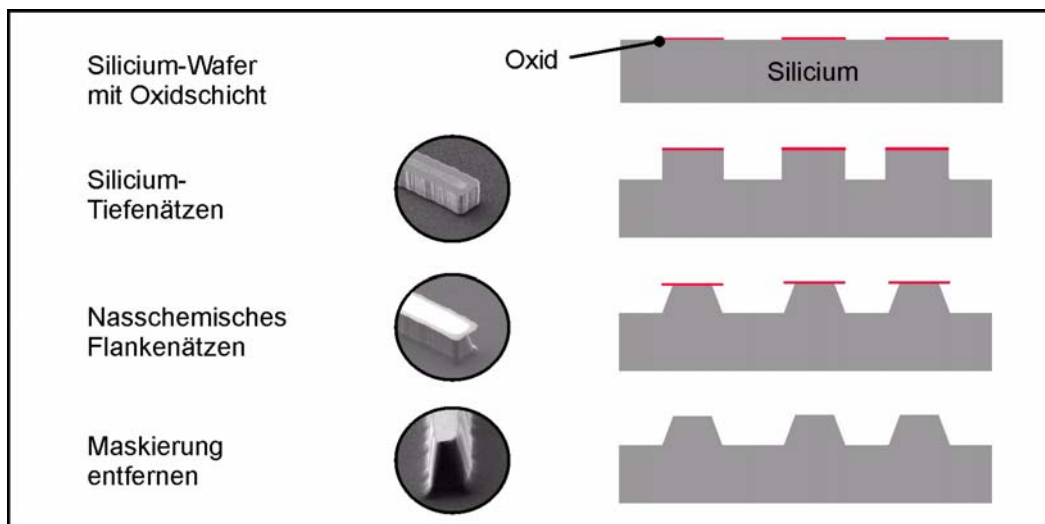


Bild 3-2: Herstellung von Silicium-Mastern bzw. -Abformwerkzeugen.

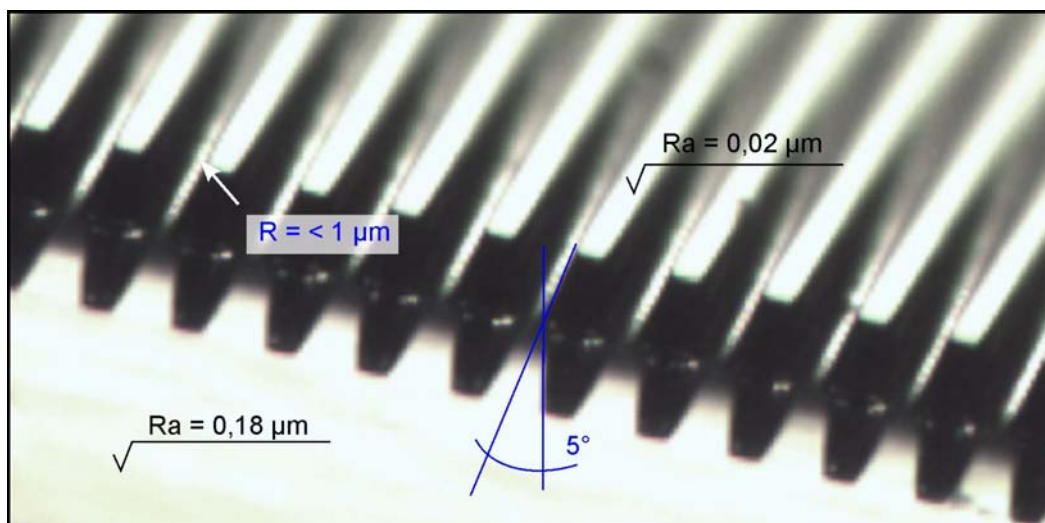


Bild 3-3: Mikroskopische Aufnahme eines Silicium-Werkzeugs.

zess mit einem Glanzätzer bestehend aus $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 5:3:3$ für ca. 20s durchgeführt. Das Verfahren beruht auf dem Patent von Richter und Fischer [RIC04]. Neben der Oberflächenglättung wird durch eine erhöhte Ätzrate im Maskierungsbereich, die auf einem sich kurzzeitig bildenden Wärmegradienten basiert, die Ausbildung eines Flankenwinkels erreicht. Das Prozessschema ist in Bild 3-2 dargestellt. Bild 3-3 zeigt eine Mikroskopaufnahme des Siliciumwerkzeugs. Der Flankenwinkel beträgt $5^\circ \pm 1^\circ$. Die mittlere Rauheit R_a ist anhand einer Messstrecke von 2 mm mit einem Profilometer /FRT/ ermittelt. Sie beträgt auf der geätzten Fläche $0,18 \mu\text{m}$ und auf der Prägestruktur $0,02 \mu\text{m}$. Die Werkzeuge haben scharfe Kanten mit Radien unter $1 \mu\text{m}$. Ein großer Nachteil des Materials Silicium besteht in seiner Sprödhheit, die schnell zu Werkzeugbruch führt. Im Labormaßstab und zur Prototypenfertigung ist die Verwendung solcher Stempel dennoch wirtschaftlich. Die Oberfläche von Silicium-Stempeln kann mit fluorkarbonhaltigen Plasmapolymerschichten hydrophobisiert wer-

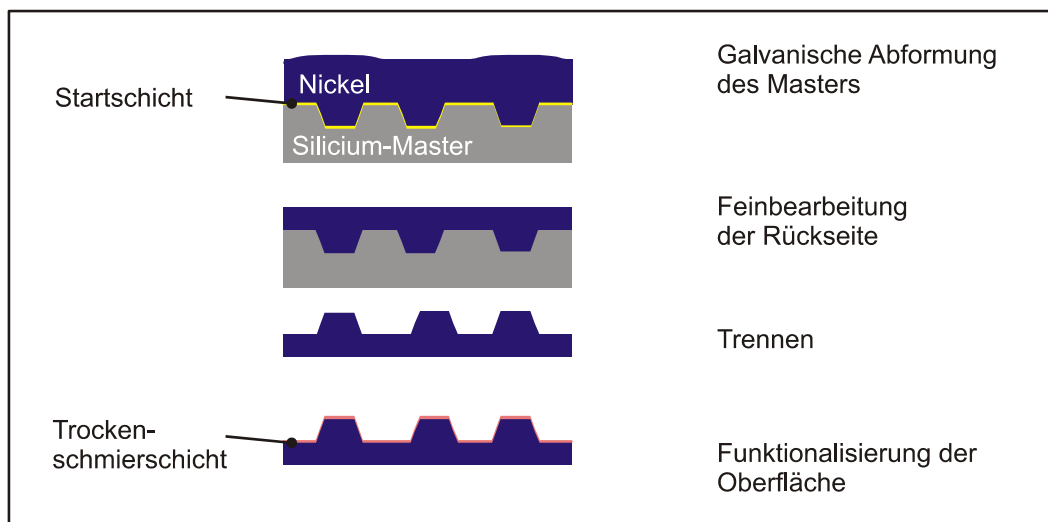


Bild 3-4: Prozessablauf zur Herstellung von Nickelwerkzeugen.

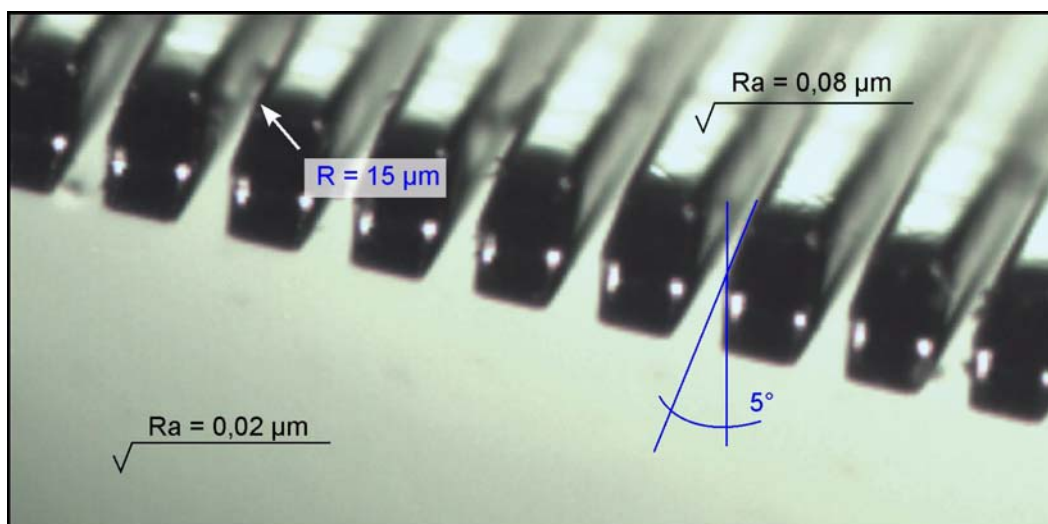


Bild 3-5: Mikroskopaufnahme eines von einem Siliciumwafer abgeformten Nickelwerkzeugs.

den [YAN04]. Da durch die gesättigten Bindungen an der Oberfläche die Adhäsion vermindert wird, verspricht diese Oberflächenbehandlung eine Unterstützung der Entformung. Am Institut sind Beschichtungsmethoden im RIE-Verfahren (Reactive Ion Etching) und im ICP-Verfahren (Inductive Coupled Plasma) etabliert. Die Untersuchung der Verschleißigenschaften beider Schichtvarianten zeigt eine höhere Belastbarkeit der im ICP-Prozess erzeugten Schichten [BUC06]. Daher wurde hier dieses Verfahren ausgewählt. Schichten mit einer Dicke von 40 nm werden erprobt.

3.2.3 Galvanisch abgeformte Werkzeuge aus Nickel

In dieser Arbeit kommen zwei Methoden zur Masterfertigung für die galvanische Abformung zum Einsatz. Siliciumwafer, die nach dem Ablauf in Bild 3-2 hergestellt sind, werden bei hohen Präzisionsanforderungen verwendet. Eine kostengünstige Alternative ist die Strukturformung durch Lithographie in Dickresist auf Glassubstraten oder Leiterplatten. Die Replikationsmaster werden entweder direkt auf prozesskompatiblen Substraten der Firma CDA GmbH strukturiert [MIK09] oder vom Dienstleister aufgekittet. Die vollständige Prozessierung, vom Sputtern der Startschicht über die Planarisierung bis zum Trennen vom Master erfolgt beim Dienstleister. Bild 3-4 stellt den Prozess der Galvanoformung schematisch dar. Nach Ausschneiden der Werkzeugkontur durch erosive Verfahren oder Lasern ist das Werkzeug einsatzbereit.

Bild 3-5 zeigt eine Mikroskopaufnahme eines vom einem Siliciumwafer abgeformten Nickelstempels. Die Rauheit beträgt $0,24\text{ }\mu\text{m}$ am Boden und $1,1\text{ }\mu\text{m}$ auf der Prägestruktur. Der Flankenwinkel wird durch das Siliciummätzen definiert (s. Abschnitt 3.2.2) und beträgt 5° .

Beim Einsatz der Dickresistlithographie bestimmt die Kantenausbildung des Resistes den Ausformwinkel. Ein besonders kostengünstiges Verfahren stellt die Strukturierung

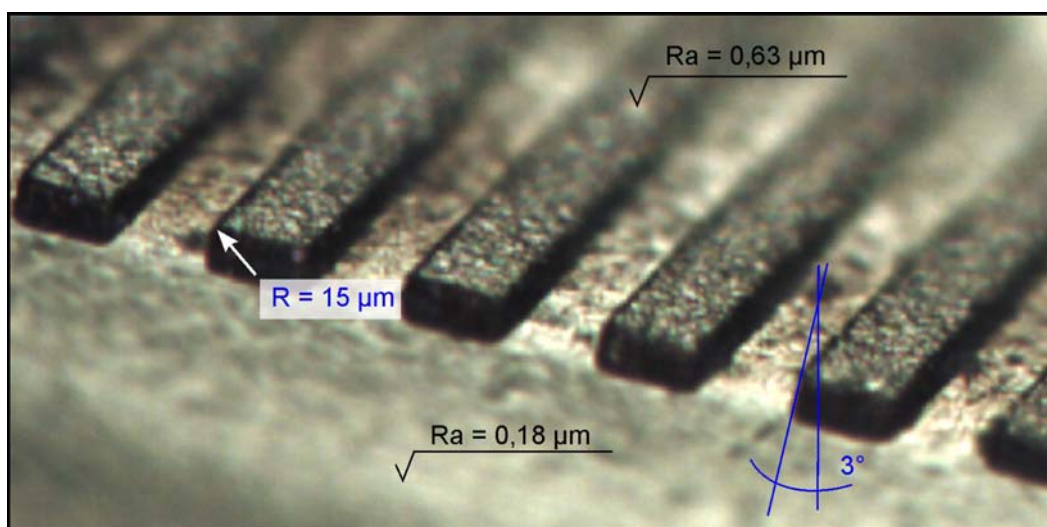


Bild 3-6: Nickelwerkzeug, abgeformt von einem Dickresistmaster und veredelt mit DURNI-DISP-Verfahren.

von Trockenresistschichten auf Leiterplatten dar. Bild 3-6 zeigt ein so hergestelltes Werkzeug. Der Ausformwinkel beträgt ca. 3° bei einer Strukturhöhe von $40\mu\text{m}$, das Verfahren ist zur Herstellung von Strukturen bis zu einer Maximalhöhe von $50\mu\text{m}$ geeignet.

Nickelwerkzeuge können mit einer galvanisch aufgetragenen Trockenschmierschicht funktionalisiert werden. Dieses sogenannte PTFE-DURNI-DISP-VERFAHREN [DUR06, DUR08] bietet die Firma AIMT AHC OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH an. Es beruht auf dem homogenen Einbau fester PTFE-Partikel mit einer Korngröße von $0,1\mu\text{m}$ bis $0,3\mu\text{m}$ in eine chemisch abgeschiedene Nickelschicht. Das in Bild 3-6 dargestellte Werkzeug ist damit überzogen. Die Mindestschichtdicke beträgt $3\mu\text{m}$, die Oberflächenbehandlung ist mit einer Erhöhung der Rauheit verbunden. Laut Herstellerangabe werden Haftreibung und Gleitverschleiß reduziert. Die Abformung unter Verwendung dieser Beschichtung wurde bis 80°C mit dem Material DP951 erprobt, die Ausformung erfolgte problemlos.

3.2.4 Trennmittel zur Schmierung

Neben mineralölbasierten Trennmitteln werden technisch auch umweltverträglichere biologische Schmierstoffe eingesetzt, die beispielsweise aus Ölsaaten gewonnen werden [WIK09]. Aus dieser Schmierstoffgruppe wurde Leinöl ausgewählt und die weitere Prozessierbarkeit der oberflächenmodifizierten Grünfolien in einem Kompatibilitätstest untersucht.

An der Oberfläche verbleibende Rückstände dürfen die Lamination nicht beeinflussen. Zur Evaluierung wurde Leinöl dünn mit einem Pinsel auf die Folienoberfläche aufgetragen, jeweils 3 Grünfolien DP951 wurden mit einem Silicium-Werkzeug geprägt und anschließend bei geringem Laminationsdruck von 2MPa mit einer Lage DP951PT ohne Laminationshilfsmittel uniaxial bei 70°C laminiert. Die Substrate wurden frei im Laborofen gesintert (s. Abschnitt A 1.1) und anschließend aufgesägt. Bild 3-7 zeigt Aufnahmen der Kanäle. Es wurden keine Delaminationen beobachtet. Die Schmiermethode beeinträchtigt die Lamination nicht.

Die Beeinflussung der Grenzschicht an der Kontaktzone zum Werkzeug durch die Anwendung von Öl wurde an Querschliffen von DP951-Folien, präpariert mit einer

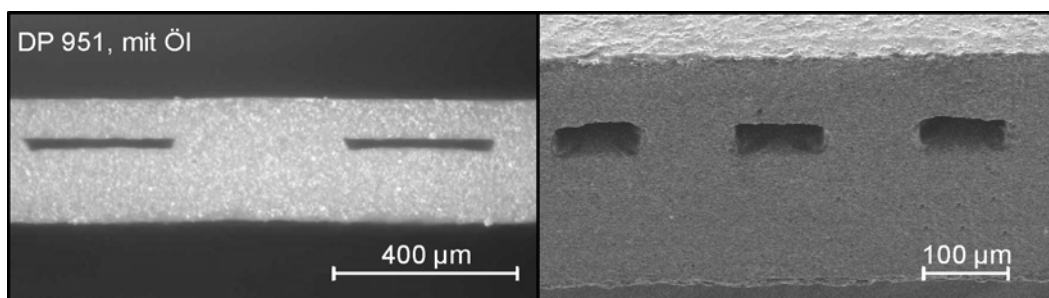


Bild 3-7: Mit Schmierung hergestellte Kanalstrukturen nach dem Sintern.

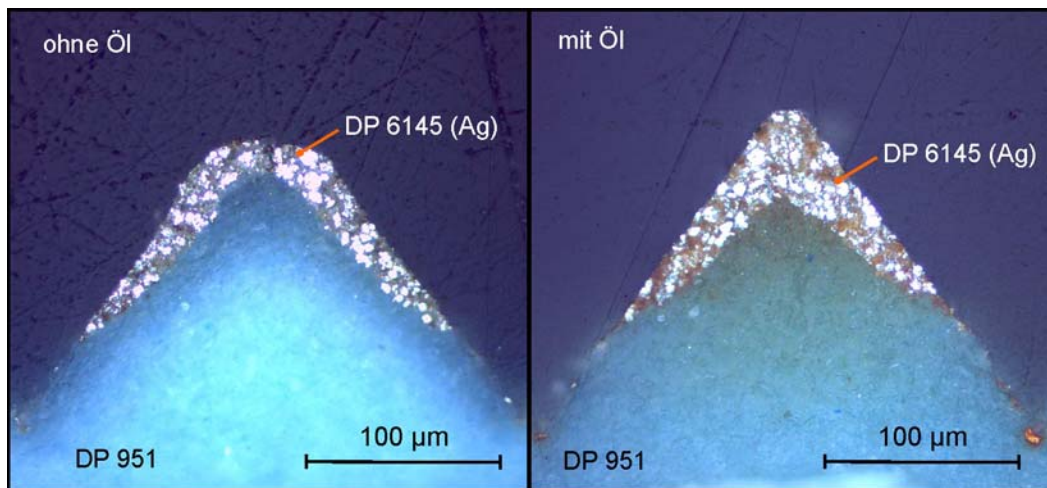


Bild 3-8: Beeinflussung des Oberflächenzustandes der Werkstoffpaarung Silicium-DP951 durch Leinöl.

Silberpaste (DP6145) betrachtet. Proben wurden jeweils mit und ohne Leinöl mit einem naßchemisch, anisotrop geätzttem Siliciumwerkzeug abgeformt. Bild 3-8 zeigt die Mikroskopaufnahmen. Die Benetzung der Oberfläche mit Öl bewirkt eine Verminderung der Haftreibung. Deutlich ist die Verminderung der Materialmitnahme an der Oberfläche zu erkennen.

3.3 Prozesscharakterisierung mit statistischer Versuchsplanung

3.3.1 Vorbetrachtungen

In diesem Abschnitt soll die optimale Kombination der Prozessparameter für ein gutes Abformergebnis ermittelt und ihr Einfluss unter Herausarbeitung signifikanter Abhängigkeiten quantifiziert werden. Die angewandte Methodik der statistischen Versuchsplanung betrachtet den Prägeprozess als BLACK BOX, welche die Eingangsgrößen unter Annahme linearer Funktionen auf die Zielgrößen abbildet. Das Experiment wird am Beispiel des Materials DP951 durchgeführt, eine Erweiterung der Vorgehensweise auf die anderen Materialien in weiterführenden Experimenten ist möglich. Zunächst gilt es, alle Einflüsse zu ermitteln und eine geeignete Versuchsdurchführung sowie sinnvolle Auswertekriterien zu definieren. Dazu werden alle bekannten Einflüsse und Wirkungen in der Systemanalyse bewertet. Basierend auf diesen zusammengetragenen Kenntnissen und Erfahrungen wird ein Versuchsplan erstellt.

3.3.2 Systemanalyse

Unter Einbeziehung des aktuellen Kenntnisstandes werden alle Prozesseinflüsse zusammen getragen, anschließend bewertet und reduziert, um die Versuchsumfang auf ein Minimum zu beschränken. Die Auswahl aussagekräftiger Zielfunktionen zur Beurteilung des Prozessergebnisses erfolgt unter dem Gesichtspunkt der qualitätsgerechten

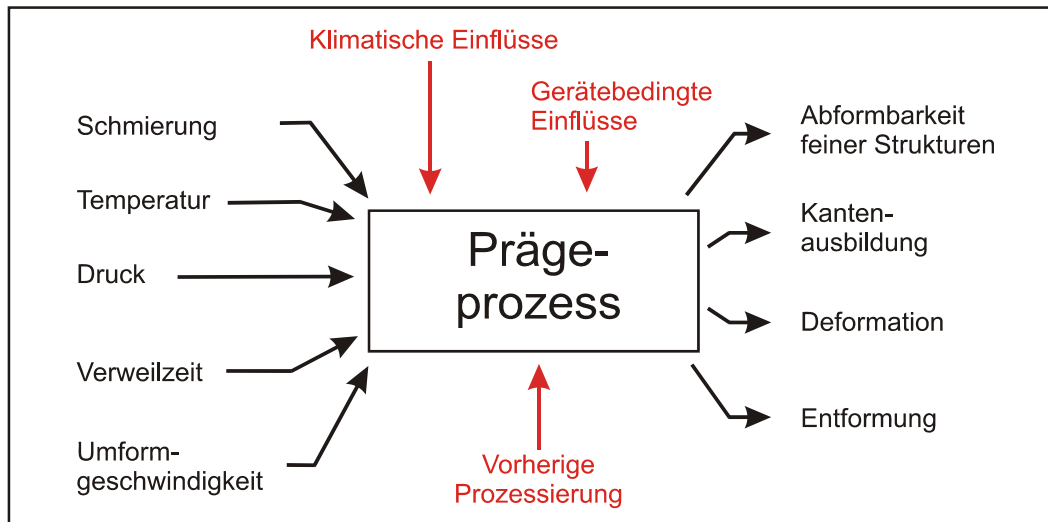


Bild 3-9: Einfluss- und Zielgrößen beim Prägen von LTCC-Folien.

Durchführbarkeit von Folgeprozessen. Bild 3-9 zeigt einen schematischen Überblick der prozessrelevanten Größen beim Prägen. Links sind die Stellgrößen angeordnet. Wie Bild 3-8 zeigt, bestimmt die Werkzeugschmierung die Grenzflächeneigenschaften und damit die Reibungsverhältnisse. Der Temperatureinfluss auf die Materialeigenschaften wurde in Kapitel 2 betrachtet. Das Erweichen der Polymermatrix mit zunehmender Temperatur beeinflusst neben dem Fließverhalten die Haftung zwischen Grünfolie und Werkzeug. Der angewendete Prägedruck bestimmt den Spannungszustand und den Verdichtungsgrad. Die Verweilzeit unter Last muss so lang gewählt werden, dass transiente Vorgänge abgeklungen sind und der Gleichgewichtszustand der plastischen Verformung erreicht ist. Die Umformgeschwindigkeit bzw. die Druckaufbaurrate haben ebenfalls Einfluss auf das viskoelastische Verhalten der Werkstoffe. Aus dem Scherversuch (s. Kapitel 2, Bild 2-6) folgt, dass die Änderung der viskoelastischen Moduln aufgrund der Scherrate gering ist. Dieser Parameter wird im Versuchsplan nicht berücksichtigt und konstant gehalten. Aus den Überlegungen ergeben sich vier zu variierende Prozessparameter: Temperatur, Druck, Verweilzeit und Schmierung. Zwischen diesen Größen werden keine Wechselwirkungen erwartet.

Weitere Einflussgrößen sind der Trocknungs- und Lagerungszustand der Grünfolien, klimatische Bedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Vorprozessierung wie Lamination oder Siebdruck von Funktionsschichten, gerätebedingte Einflüsse wie die Parallelität der Presse und die Genauigkeit der Endkraft. Davon sind die Parallelität der Presse, Vorprozessierung sowie Trocknungs- und Lagerungszustand als systematische Einflüsse einzuordnen, die beschrieben und konstant gehalten werden können. Zufällige Einflüsse wie klimatische Bedingungen, Parallelitätsabweichungen durch die Anordnung in der Presse sowie die Einstellung der Endkraft müssen durch den Versuchsablauf minimiert werden.

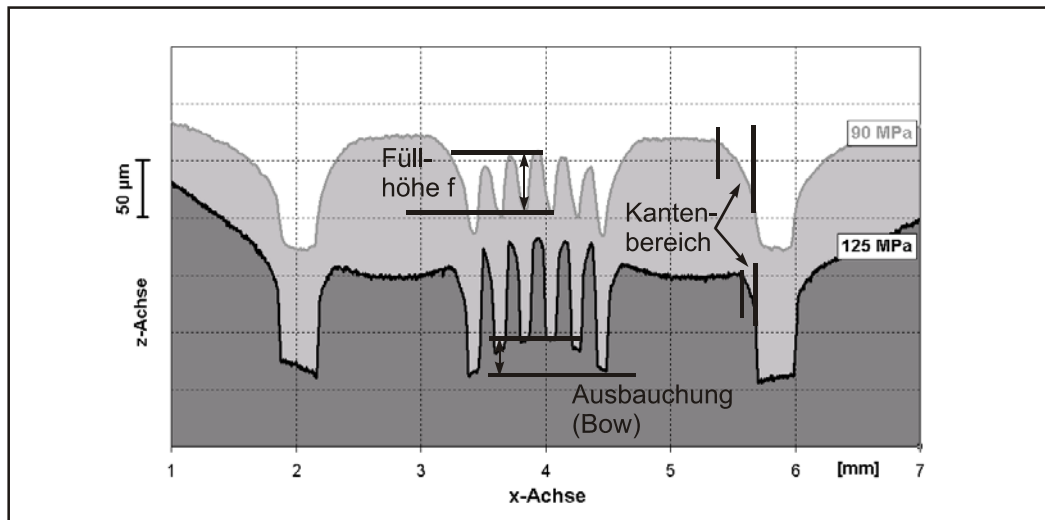


Bild 3-10: Bestimmung der Auswertegrößen aus der Profilmessung.

Technologische Zielgrößen sind neben einer vollständigen Formfüllung eine gute Entformbarkeit, Formstabilität und Verarbeitbarkeit in Folgeprozessen sowie eine möglichst kurze Zykluszeit. Die Profildarstellungen geprägter Grünfolien bei verschiedenen Prägedrücken in Bild 3-10 zeigen, dass die Feinstrukturen in der Mitte bei geringerem Prägedruck nicht vollständig abgeformt und die Kantenbereiche des Werkzeuges nicht vollständig gefüllt werden. Eine optimale Formfüllung erfordert die Maximierung der Stegfüllhöhe f sowie die Minimierung des Kantenbereiches. Der geprägte Bereich verwölbt sich. Diese Ausbauchung (Bow) muss zur Gewährleistung der Formstabilität in Folgeprozesse minimiert werden. Ein weiteres Kriterium für eine stabile Prozessführung ist die leichte Entformbarkeit der Grünfolie aus dem Werkzeug. Diese vier Kriterien werden zur Auswertung herangezogen.

3.3.3 Versuchsplanung

Planmatrix

Aus der Systemanalyse ergeben sich vier zu untersuchende Einflüsse: Schmierung, Temperatur, Prägedruck und Verweilzeit. Da keine Wechselwirkungen zwischen diesen Eingangsgrößen zu erwarten sind, wird ein Matrixexperiment nach dem Hochvermengeningsprinzip mit einem standardisierten orthogonalen L9-Feld nach TAGUCHI ausgewählt [KLE04]. Dieses erlaubt die Untersuchung der Wirkung von 4 Faktoren mit jeweils 3 Stufen in insgesamt 9 Versuchen auf eine Zielgröße unter Vernachlässigung der Wechselwirkungen. Der Arbeitsbereich muss anhand der vorhandenen Informationen eingegrenzt werden. Tabelle 3-2 zeigt die untersuchten Faktoren und ihre festgelegten Stufen. Der Druck wird im Intervall zwischen 90 MPa und 120 MPa betrachtet. Hier erfolgen merkliche plastische Deformationen (s. Bild 2-30) und die Kompressibilität ist konstant, d.h. es findet keine weitere Verdichtung mehr statt (s. Bild 2-33). Die Verweilzeit wird zwischen 5 und 15 Minuten festgelegt. In diesem Zeitintervall sind

Tabelle 3-2: Einflussfaktoren auf den Prägeprozess und Festlegung der Faktorenstufen.

	Stufe			
Faktor	1	2	3	Einheit
Druck p_p	90	105	120	MPa
Verweilzeit t_{vw}	5	10	15	min.
Temperatur T	60	80	100	°C
Schmierung μ	ohne	Öl	FC	keine

Tabelle 3-3: Planmatrix für den Versuch zur Optimierung der Prägeparameter, FC=fluorkarbonhaltige Plasmapolymerschicht.

Exp. Nr	Prägedruck p_p [MPa]	Verweilzeit t_{vw} [min]	Temperatur T [°C]	Schmierung μ
1	90	5	60	ohne
2	90	10	80	Öl
3	90	15	100	FC
4	105	5	80	FC
5	105	10	100	ohne
6	105	15	60	Öl
7	120	5	100	Öl
8	120	10	60	FC
9	120	15	80	ohne

transiente Vorgänge abgeklungen (s. Tabelle 2-4). Die Temperatur wird zwischen 60°C und 100°C variiert, da sich in diesem Bereich die viskoelastischen Moduln am stärksten ändern (s. Bild 2-5). Für den Einsatz von Schmiermitteln sind Verfügbarkeit und Prozesskompatibilität entscheidend. Da die Versuche mit einem Siliciumwerkzeug durchgeführt werden, ergeben sich zwei Möglichkeiten: die Verwendung von fluorkarbonhaltigen Plasmapolymerschichten (FC) als Trockenschmierschicht und die von Leinöl als Trennmittel (s. Abschnitt 3.2.4). Tabelle 3-3 zeigt die aus dem Parameterfeld erstellte Planmatrix für die Versuche. Jedes Experiment wird zweimal ausgeführt, um die statistische Sicherheit zu erhöhen.

Auswertekriterien

Abschnitt 3.3.2 arbeitet vier Beurteilungskriterien für die Abformqualität heraus. Die vollständige Formfüllung als ein Prozessziel wird durch die Füllhöhe an feinen Strukturen und die Kantenausbildung beschrieben. Beeinträchtigungen bei der weiteren Verarbeitung der Folien nach dem Prägen treten durch die Ausbauchung (Bow) auf. Diese Größen können aus Profilmessungen ermittelt werden (s. Bild 3-10).

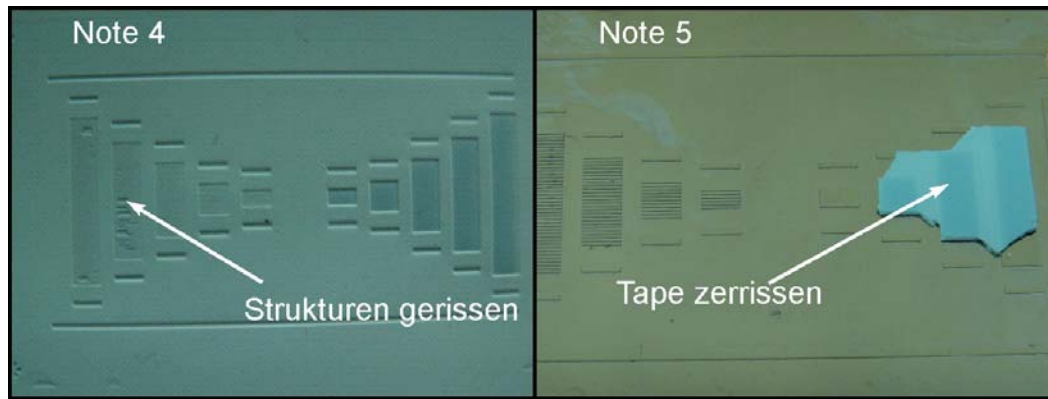


Bild 3-11: Fehlerbilder beim Ausformen der LTCC-Folien nach dem Prägen.

Tabelle 3-4: Bewertungsschema für die Entformbarkeit.

1	Sehr gut entformbar, Teil löst sich von selbst aus der Form
2	Gut entformbar, Teil löst sich bei leichtem Zug aus der Form
3	Entformbar, Teil löst sich unter Zug ohne Strukturbeschädigung aus der Form
4	Entformbar mit Fehlern, Teil löst sich unter Zug aus der Form, Strukturen werden beschädigt
5	Festkleben, Teil nur unter Zerstörung entformbar

Die Entformbarkeit des Prägeteils wird qualitativ nach einer Skala von 5 Noten, aufgelistet in Tabelle 3-4, bewertet. Die Noten 1-3 beschreiben akzeptable Ausformbedingungen, während 4 und 5 als Ausschuß eingeordnet werden (s. Bild 3-11). Versuche mit einer Gesamtbewertung schlechter als 3 werden als nicht prozessierbar eingestuft.

Versuchsablauf

Um zufällige Fehler bei der Versuchsdurchführung zu minimieren, wird der beschriebene Ablauf bei allen Experimenten eingehalten.

Nach dem Zuschneiden der Nutzen aus DP951 erfolgt die Trocknung unmittelbar vor der Abformung bei 80 °C für 10 min im Laborofen. Dadurch ist ein definierter Oberflächenzustand gewährleistet. Als Werkzeug dienen Siliciumstempel mit 50 µm breiten Linien, die in einem Abstand von 50 µm angeordnet und 75 µm tief sind (s. Bild 4-3). An den schmalen Strukturen wird die Füllhöhe f beurteilt. Maß für die Kantenausbildung ist die Verrundung an einer im Abstand von 2 mm angeordneten 300 µm breiten Struktur (vgl. Bild 3-10). Die Werkzeugoberfläche wird unmittelbar vor dem Versuch gemäß Abschnitt 3.2.2 bzw. Abschnitt 3.2.4 präpariert. Die Anordnung des Siliciumwerkzeugs in der uniaxialen Presse /Weber/ zeigt Bild 3-12. Die vorbereiteten Grünfolien liegen auf dem Werkzeug, eine 25 µm dicke Polyimidfolie (KAPTON) verhindert die Haftung am oberen Pressenstempel. Eine konstante laterale Position der Anord-

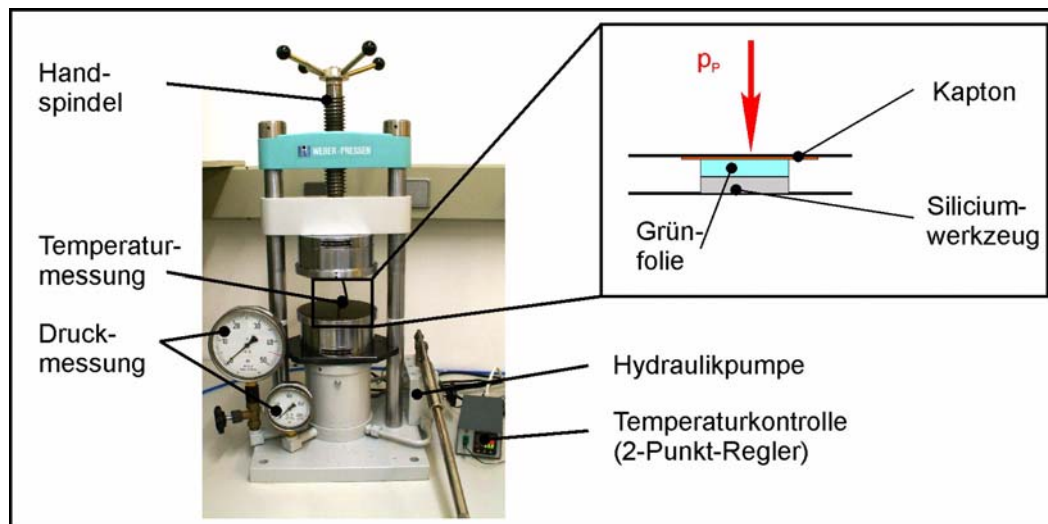


Bild 3-12: Versuchsanordnung beim Prägen.

nung in der Presse zur Minimierung von Parallelitätstoleranzen wird durch Markierung der Einlegeposition gewährleistet. Den Prägedruck p_p bringt eine manuelle Hydraulikpumpe auf. Zur Kontrolle des Druckendwertes stehen analoge Druckmesser mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,5 kN zur Verfügung, wodurch eine Auflösung des Prägedrucks von 5 MPa für das Testlayout erreicht wird. Die Temperaturkontrolle erfolgt mit einem Zweipunktregler, dessen Messelement sich an der unteren Pressenplatte befindet. Die maximale Schwankung der Isttemperatur am Werkzeug beträgt 3 K. Die Versuchszeit wird mit einer Stoppuhr kontrolliert. Unmittelbar nach dem Versuch wird die Entformung bewertet. Nach Vermessung der Geometrie mit einem Profilometer / Cyberscan/ werden die Ergebnisse entsprechend der Vorgehensweise in [KLE04, Seite 35 ff.] aufbereitet.

Bei der Mittelwertanalyse (ANOM = ANALYSIS OF MEANS) wird der arithmetische Mittelwert aller Ergebnisse (Prozessmittelwert) zur jeweiligen mittleren Abweichung der einzelnen Faktorwirkung (analog einer Betrachtung des linearen Kontrastes) in Bezug gesetzt und die Ergebnisse im Faktorwirkungsdiagramm dargestellt. Diese erlauben die Schätzung der Faktortendenz und die Ableitung von Prognosen zur optimale Parametereinstellung sowie zur Optimierungsrichtung. Ein besseres Verständnis resultiert aus der Zerlegung in Einzelvarianzen, der Varianzanalyse (ANOVA = ANALYSIS OF VARIANCES). Mit ihrer Hilfe werden die Faktorenwirkungen auf die Zielfunktion quantitativ abgeschätzt und damit dem Experimentator die wesentlichen Optimierungswege verdeutlicht. Die jeweilige Faktorvarianz wird zur Streuung der Messwerte in Bezug gesetzt. Durch Vergleich mit einem tabellierten Grenzwert (FISHER-Wert, siehe [KLE04, Seite 306 ff.]) wird geschlussfolgert, ob der Faktor einen signifikanten oder nur zufälligen Einfluss hat. Beide Auswertungen werden mit den Versuchsergebnisse ausgeführt, die Ergebnisse hinsichtlich der Auswertekriterien werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

3.3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertungen werden je nach Randbedingung auf eine Maximierungs- bzw. Minimierungsaufgabe in Form einer Echtwertanalyse zurückgeführt. Bild 3-13 zeigt die Faktorwirkungsdiagramme der betrachteten Zielgrößen und Tabelle 3-5 die Ergebnisse der Varianzanalyse.

Optimale Kantenausbildung wird durch hohe Temperatur, hohen Prägedruck und Schmierung mit Öl begünstigt. Aus der Varianzanalyse folgt, dass Druck und Temperatur den stärksten Einfluss auf dieses Kriterium haben. Die Verweilzeit hat keinen signifikanten Einfluss auf das Abformergebnis, daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Fließvorgänge nach 5 Minuten bereits abgeschlossen sind.

Die maximale Füllhöhe der Stege wird bei Schmierung mit Öl, hoher Temperatur und hohem Druck erreicht. Verweilzeit und Temperatur haben keinen signifikanten Einfluss auf das Abformergebnis im betrachteten Intervall. Den stärksten Einfluss übt der Schmierzustand aufgrund der Dominanz der Grenzflächeneigenschaften über die Volumeneigenschaften an den feinen Strukturen aus.

Die Ausbauchung (Bow), wird von keinem der Faktoren signifikant beeinflusst.

Beste Entformbarkeit liegt bei 60°C und Schmierung mit Öl vor. Diese beiden Faktoren haben laut Varianzanalyse signifikante Wirkung, wobei die Reibung stärker ins Gewicht fällt.

Aus diesen Beobachtungen werden Empfehlungen für eine optimale Prozessführung abgeleitet. Bei der Parameterwahl muss ein Kompromiss zwischen guter Abformung und Entformbarkeit gefunden werden. Schlüsselparameter ist hierbei die Temperatur. Die Folien sind unter dem Gesichtspunkt entwickelt, bei 70°C zu erweichen und zu

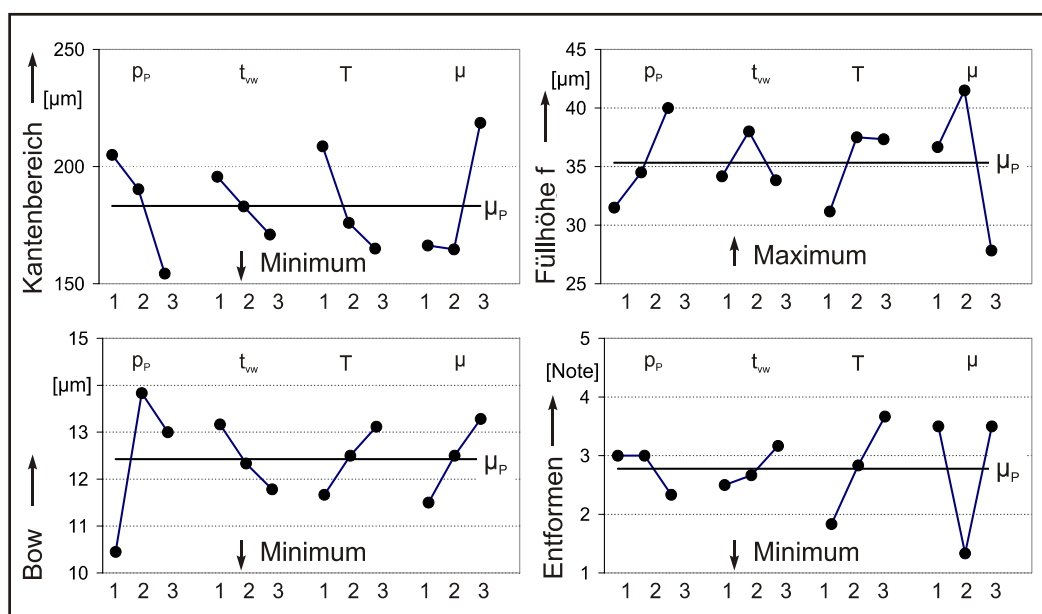


Bild 3-13: Faktorwirkungsdiagramme der einzelnen Zielgrößen.

Tabelle 3-5: Signifikanz der Faktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Zielgrößen als Ergebnis der Varianzanalyse.

	Füllhöhe	Ausbauchung (Bow)	Kantenbereich	Entformen
Druck	signifikant	nicht signifikant	hoch signifikant	nicht signifikant
Verweilzeit	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
Temperatur	nicht signifikant	nicht signifikant	hoch signifikant	signifikant
Reibung	hoch signifikant	nicht signifikant	signifikant	hoch signifikant

verkleben. Dieser bei der Lamination erwünschte Effekt ist beim Prägen hinderlich. Ohne Schmiermittel muss daher die Prägetemperatur auf ca. 60°C begrenzt werden, auch mit Öl als Schmiermittel sollten 80°C nicht überschritten werden.

Die Schmierung ist vor allem bei der Abformung feiner Strukturen maßgebend. Sie beeinflusst neben der Entformbarkeit die Formfüllung in hohem Maße. Fluorkarbonhaltige Plasmapolymerschichten zeigen im Gegensatz zu Öl keine wesentliche Verbesserung des Reibungszustandes. Vermutlich sind sie zu dünn und werden von den Feststoffpartikeln durchstoßen oder die Schichthaftung ist nicht ausreichend.

Da die Verweilzeit keine Zielgröße signifikant beeinflusst, kann sie im Interesse einer kurzen Prozesszeit auf das Minimum von 5 Minuten begrenzt werden.

Die Ausbauchung (Bow) ist vermutlich stark von Umformgrad und Layout bestimmt. Dieser Einfluss wird in Kapitel 4 näher betrachtet.

Aus dem Versuch kann für das Material DP951 ein optimaler Arbeitspunkt bei einer Temperatur von 60°C, einem Prägedruck von 100 MPa und einer Verweilzeit von 5 Minuten bei Verwendung von Leinöl als Trennmittel abgeleitet werden. Die angewandte TAGUCHI-Methode ist zur Prozessoptimierung anwendbar. Die Übertragung auf die Prozessoptimierung für andere Grünfolien ist sinnvoll.

3.4 Lagetoleranzen

Im Prozess muss sichergestellt werden, dass beim Stapeln der Einzellagen kein Versatz auftritt, damit Kontaktierungen von Lage zu Lage ihre Funktion erfüllen. Die Stabilität der Toleranzen muss auch bei Lagerung der Grünfolien über einen prozessüblichen Zeitraum gewährleistet sein, Lageänderungen durch Relaxationsprozesse müssen ausgeschlossen werden. Um diese Qualitätsanforderungen sicher zu stellen, wird die Stabilität der Lagetoleranzen im Prozessdurchlauf untersucht. Bild 3-14 zeigt den Versuchsablauf mit Kontrollpunkten. Die Kontrollvias werden in die Grünfolie

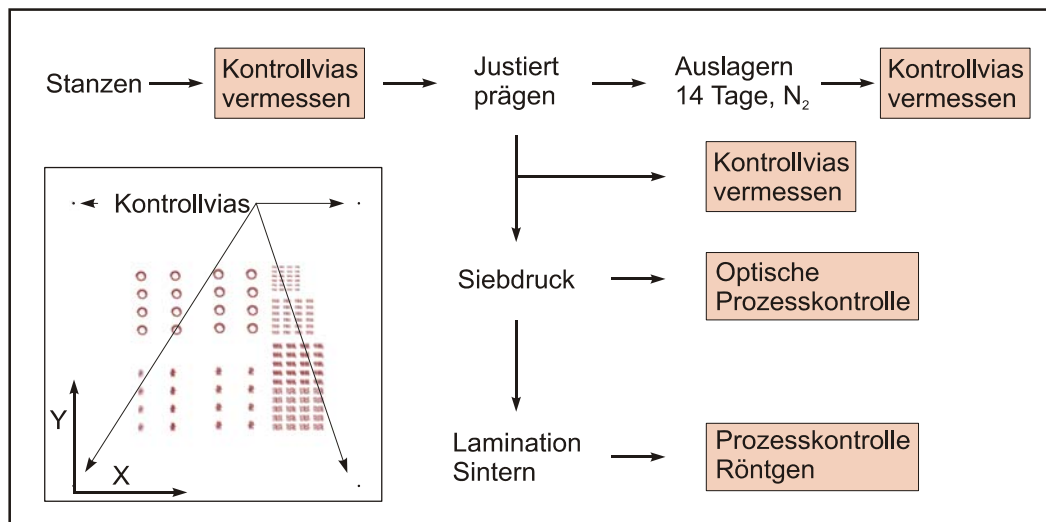


Bild 3-14: Prüfablauf zur Bestimmung der Lagetoleranzen.

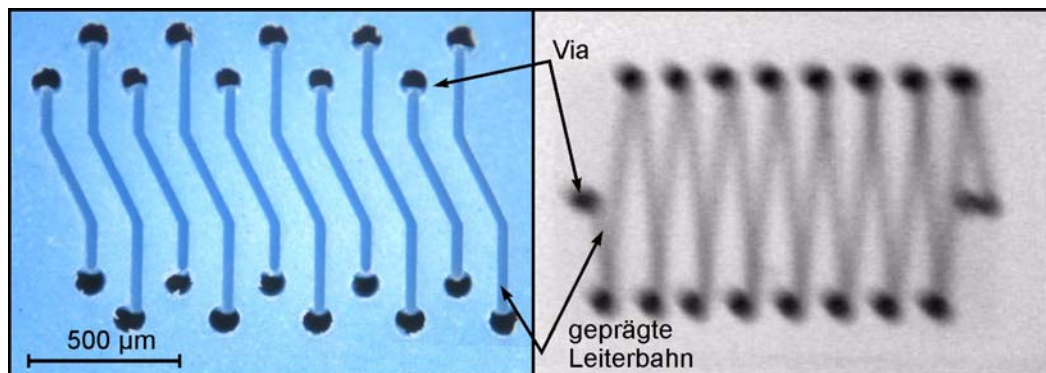


Bild 3-15: Positionskontrolle der geprägten Strukturen, links Mikroskopaufnahme der ungefüllten Grünfolie, rechts Röntgenbild der gesinterten Keramik.

Tabelle 3-6: Ermittelte Lage der Kontrollvias, die Standardabweichung der Messmethode beträgt 0,03 mm.

Prozessschritt	Mittelwert x [mm]	Mittelwert y [mm]	Standardabweichung [mm]
Entwurfsmaß	60	60	-
Gestanz	60,01	59,97	0,02
Geprägt	59,98	60,0	0,01
Ausgelagert	60,0	59,99	0,02

gestanzt und dienen als Justiermarken für die anschließende optische Ausrichtung des Prägestempels. Ihre Position wird nach dem Stanzen, nach dem Prägen und nach Auslagerung der Folien für 2 Wochen in einer Stickstoffatmosphäre untersucht. Die Vermessung der Viapositionen erfolgt mit einem Messmikroskop /UHL/. Zunächst wird die Standardabweichung der Messung am Prägewerkzeug aus der Position der Prägemarken, die in einem Abstand von 60 mm angeordnet sind, ermittelt. Bei einem Stichprobenumfang von 10 Messungen ergibt sich ein Wert von 30 µm.

Die Mittelwertbildung zur Versuchsauswertung erfolgt über jeweils zwei Messstrecken in x- und y-Richtung pro Substrat und fünf Substrate. Jede Messung wird 3 mal ausgeführt. Bei den Ergebnissen in Tabelle 3-6 ist die letzte Kommastelle gerundet. Die maximale Abweichung vom Entwurfswert beträgt $30\mu\text{m}$ und wurde nach dem Stanzen in y-Richtung ermittelt. Da dieser Wert innerhalb der für das Messverfahren ermittelten Standardabweichung liegt, wird die Abweichung als zufällig eingeordnet. Weder Prägen noch Auslagerung führen zu einer signifikanten Abweichung vom Entwurfsmaß. Die Lage der geprägten Strukturen ist somit als stabil einzuschätzen. Bild 3-15 zeigt eine Mikroskopaufnahme der geprägten Leiterzüge (links) und Kontrolle der Lage nach dem Prägen und Sintern (Röntgenbild rechts). Es wird deutlich, dass die Positionierung mit hoher Genauigkeit erfolgt. Bei der gesinterten Keramik ist nur eine geringfügige Stapeltoleranz zu verzeichnen. Aus dem Versuch kann geschlussfolgert werden, dass die Position der Strukturen durch die Genauigkeit des Werkzeuges bestimmt wird und über einen Zeitraum von zwei Wochen bei entsprechender Lagerung in einem abgeschlossenen Behälter unter Stickstoff stabil bleibt. Damit werden die geforderten Qualitätsbedingungen durch das Verfahren erfüllt.

3.5 Füllen mit Pasten

Das Füllen geprägter Strukturen mit Leiterbahnpasten durch Siebdruck hat die Erhöhung des Leiterbahnquerschnitts zum Ziel, wodurch eine hohe Stromtragfähigkeit bei guter Wärmeabfuhr erreicht wird (s. Abschnitt 5.1). Dieser Ansatz wurde in früheren Arbeiten begründet [ALB03]. Die Weiterentwicklung der Fülltechnologie und ihre Anwendung auf Feinstrukturen erfolgte in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe FUNKTIONALISIERTE PERIPHERIK im Projekt MIKROFUN. Der eigene Anteil an den Arbeiten umfasst die technologische Umsetzung der Prägelayouts und die Gesamtintegration in den LTCC-Prozess.

Füllen geprägter Leiterbahnen mit verfügbaren Pasten und konventionellem Siebdruck ist für kleine Aspektverhältnisse praktikabel. Bild 3-16 links unten zeigt Spiralspulen bestehend aus $50\mu\text{m}$ tiefen Linien mit einer Breite von $400\mu\text{m}$, die in das ferritsche Material AHT03-003 der Firma HERAEUS geprägt sind. Sie können durch Siebdruck mit der Paste TC7305 und TC7303 ohne zusätzlichen Prozessaufwand gefüllt werden [MIK09]. Durch das geringe Aspektverhältnis der Strukturen benetzt der Boden und die Paste füllt die Linien vollständig, wie die Darstellung links zeigt. Bei höheren Aspektverhältnissen wird der Boden nicht benetzt. Durch ihren thixotropen Charakter haftet die Paste am Sieb und wird nur an den Strukturkanten auf die Folie übertragen.

Der Auftrag von Via-Füllpasten mit Schablonendruck verbessert das Füllergebnis. Ihre Rheologie ist an das Fließen in Vias mit hohem Aspektverhältnis unter Druck angepasst. Bei Verwendung der Via-Paste DP6141 auf Silberbasis konnten geprägte Struk-

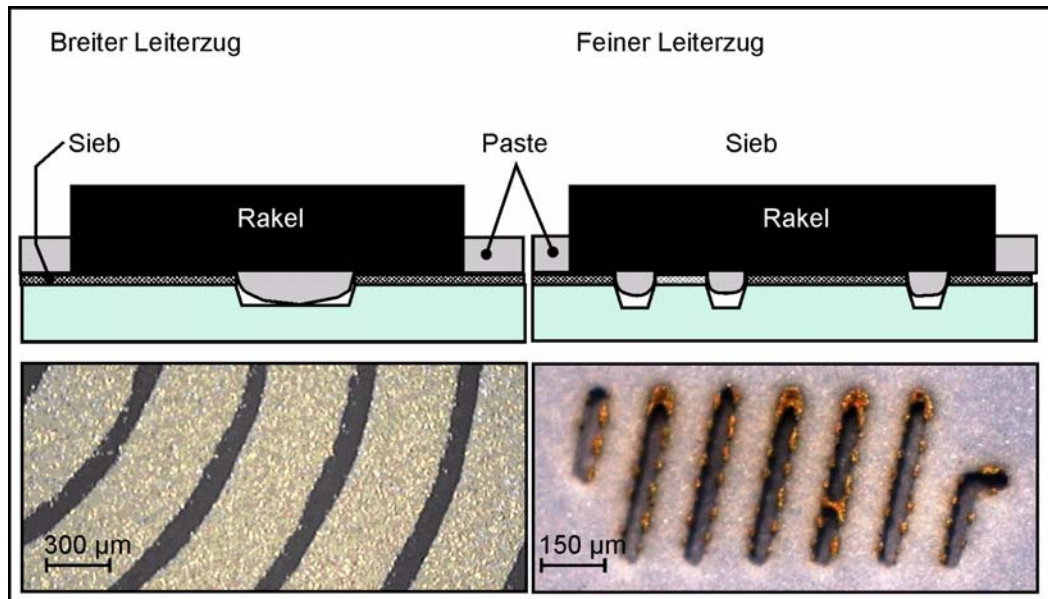


Bild 3-16: Mit Siebdruck gefüllte Leiterbahnen, links breiter Leiterzug, gedruckt mit Polyester-Gewebe, rechts feiner Leiterzug, gedruckt mit Stahlgewebe.

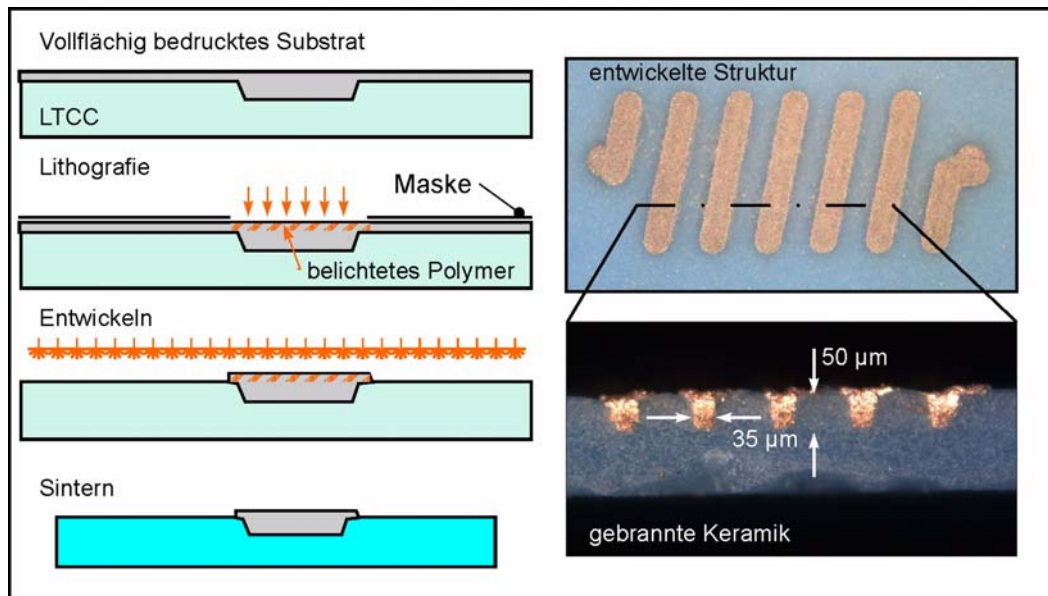


Bild 3-17: Füllen geprägter Leiterzüge mit dem FODEL[®]-Verfahren.

turen mit einer Tiefe von 80µm und Breite von 50µm erfolgreich gefüllt werden. Aufgrund der geringeren Pastenviskosität neigen die Druckbilder zum Verlaufen. Dadurch bilden sich bei einem Leiterabstand von 100µm Kurzschlüsse [PER09].

Erfolgsversprechend ist die Kombination des Prägeprozesses mit dem FODEL[®]-Verfahren. Spezielle, lithografisch strukturierbare Siebdruckpasten [DUP01] werden flächig auf die Folie gedruckt und anschließend mit UV-Licht bestrahlt. Dabei härtet das belichtete Polymer aus, die unbelichteten Bereiche werden beim Entwicklungsschritt entfernt. Mit diesem Verfahren können Auflösungen von jeweils 30µm Leiterbahnbreite und Leiterbahnabstand mit präziser Kantendefinition erreicht werden. Die Leiterbahndicke ist auf ca. 7µm begrenzt [PER07]. Durch die Aushärtung des

Oberflächenbereiches der Siebdruckschicht wird die Paste in der geprägten Struktur versiegelt und beim Entwickeln vor dem Auswaschen geschützt. Die Kombination mit dem Prägeprozess ermöglicht so die Herstellung dicker Leiterzüge mit hoher Präzision [ALB03]. Bild 3-17 stellt die patentrechtlich geschützte Prozessabfolge dar [HIN05]. Weiterführend findet der Prozess Anwendung auf Feinleiterstrukturen mit hohem Aspektverhältnis. Unter Verwendung der Silberpaste DP6453 entstehen nach dem Sintern Leiterbahnen mit einer Breite von $35\mu\text{m}$ und einer Höhe von $50\mu\text{m}$ mit einem Abstand von $70\mu\text{m}$. Durch das kombinierte FODEL[®]-Verfahren wird aufgrund des vergrößerten Leiterbahnquerschnitts bei gleicher Integrationsdichte der Flächenwiderstand und damit die Verluste um Faktor 8 gesenkt [PER 09]. Daraus ergeben sich Vorteile bei der Herstellung von Induktivitäten (s. Abschnitt 5.1.2).

3.6 Lamination fluidischer Strukturen

Vorteile der Fertigung fluidischer Bauteile durch Prägen sind hohe Genauigkeit, exakte Kantenformung und hohe Oberflächenqualität der Strukturen. Ein kritischer Schritt ist die Lamination, da ungeschützte Hohlräume beim Prozess zusammen gedrückt werden. Unter Verwendung einer Adhäsionsfolie sind mit dem Material CT800 Fluidkanäle im Drucksinterprozess herstellbar [RAB06]. Im Sinne einer einfachen Prozessführung sollte jedoch möglichst auf Sinterhilfsmittel und flüchtige Einlagen verzichtet werden. Durch uniaxiale Lamination bei geringem Druck sind diese Randbedingungen erfüllbar [BAR07a]. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Veröffentlichung sind hier kurz zusammengefasst. $70\mu\text{m}$ tief eingeprägte Linien mit einer Breite von $50\mu\text{m}$ und einem Abstand von $50\mu\text{m}$ werden bei Drücken von 1 MPa bis 10 MPa laminiert. Bild 3-18 zeigt REM-Aufnahmen der geprägten Kanalstrukturen und der Lamine im Grünzustand. Zur Präparation wurden einige geprägte und laminierte Pro-

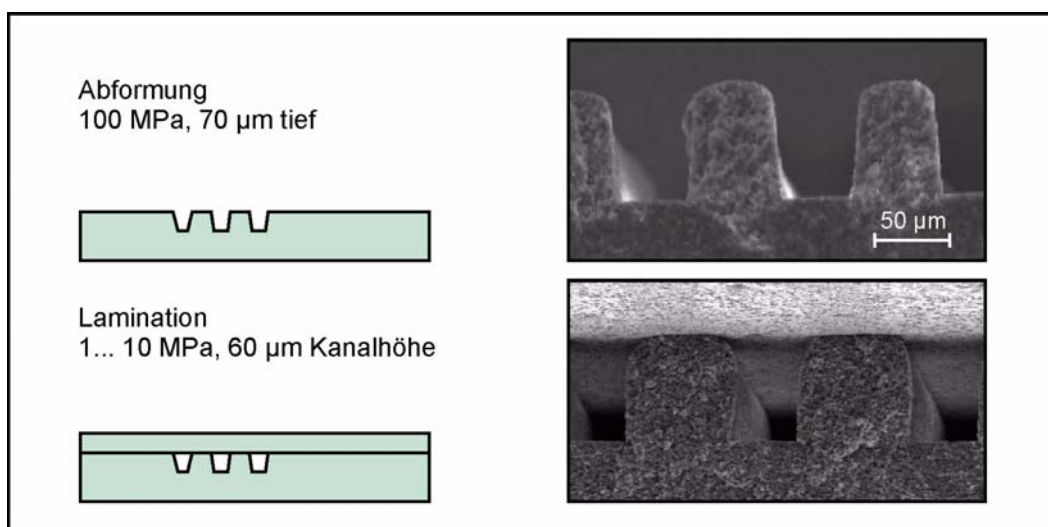


Bild 3-18: REM-Aufnahme einer geprägten Struktur und der laminierten Anordnung bei einem Laminationsdruck von 2 MPa.

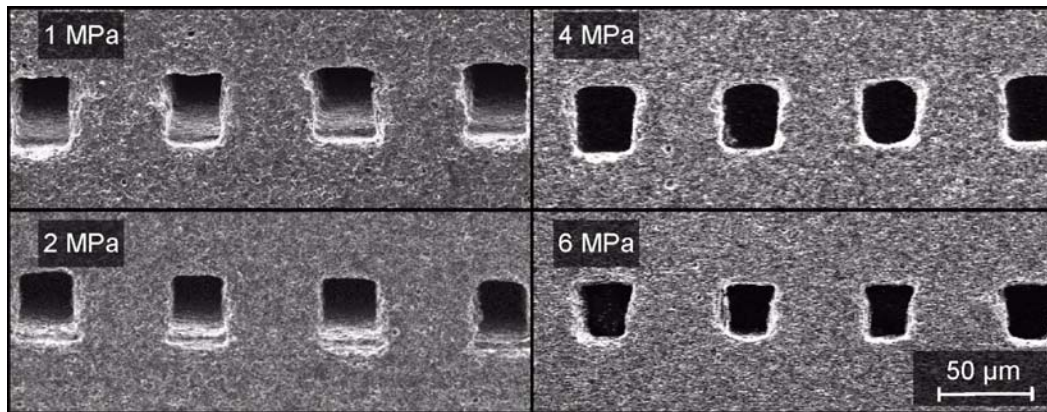


Bild 3-19: REM-Aufnahmen von Kanalstrukturen, laminiert bei verschiedenen Drücken.

ben mit flüssigem Stickstoff bei -198°C versprödet und gebrochen. Bei einem Laminationsdruck von 2 MPa verringert sich die Kanalhöhe beim Fügen um ca. $10\mu\text{m}$. Das Sintern erfolgt mit einem Standardprofil (Abschnitt A 1.1). Das Prozessergebnis wird im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Bild 3-19 zeigt Aufnahmen der mit einer Wafertrennsäge geöffneten Kanäle in der gesinterten Keramik. Bei Laminationsdrücken bis 4 MPa ergeben sich tolerierbare Einengungen des Kanals. Ein optimaler, quadratischer Kanalquerschnitt von $35\mu\text{m} \cdot 35\mu\text{m}$ entsteht bei einem Laminationsdruck von 2 MPa. Die Kanalhöhe nach dem Sintern entspricht in etwa der halben Werkzeughöhe. Der Prozess ist auf Strukturen bis zu $400\mu\text{m}$ übertragbar (siehe Bild 3-7).

3.7 Prozesskontrolle zur Herstellung verdichteter Brücken

3.7.1 Spannungsanteile und Deformation

Die thermische Entkopplung von Sensorelementen zur Fluidkontrolle erfordert die Anordnung von Funktionselementen auf freitragenden Brücken im Kanal. Beim Sintern solcher Strukturen kommt es aufgrund verschiedener Spannungseinflüsse zu Deformationen, die schematisch in Bild 3-20 dargestellt sind. Bei der uniaxialen Lamination bedingt der Kraftfluss der Anordnung unterschiedliche Verdichtungen von Volumen- und Brückenelementen sowie plastische Verformungen. Die Verformungen führen bereits im Grünzustand zu Deformation in negativer Richtung (Durchhang). Durch Verwendung von Karboneinlagen wird dem entgegen gewirkt. Beim Sintern kommt es durch die unterschiedliche thermische Dehnung und Schwindung von Siebdruckpasten und Substrat sowie unter dem Einfluss der Schwerkraft zur weiteren Deformationen. Ihre Kompensation kann durch Siebdruckschichten und Glas- bzw. Karbon-Opferschichten erfolgen [ESP98]. Der Einfluss von Siebdruckschichten ist materialabhängig. Wie in Untersuchungen zum Sinterverhalten metallisierter Glas-Keramik-Multilayer gezeigt wird, variiert der Spannungszustand je nach Substrat und

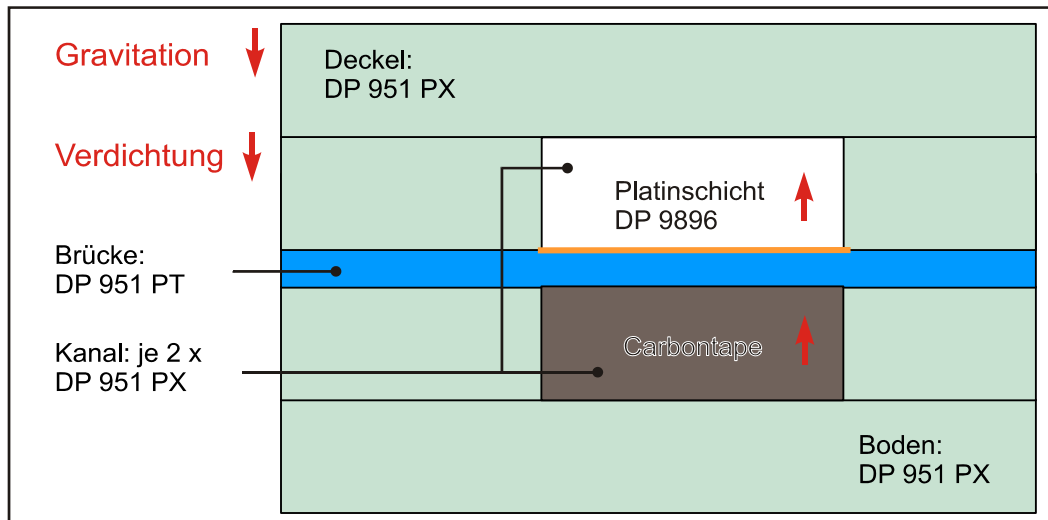


Bild 3-20: Deformationseinflüsse an einer freitragenden Keramikbrücke.

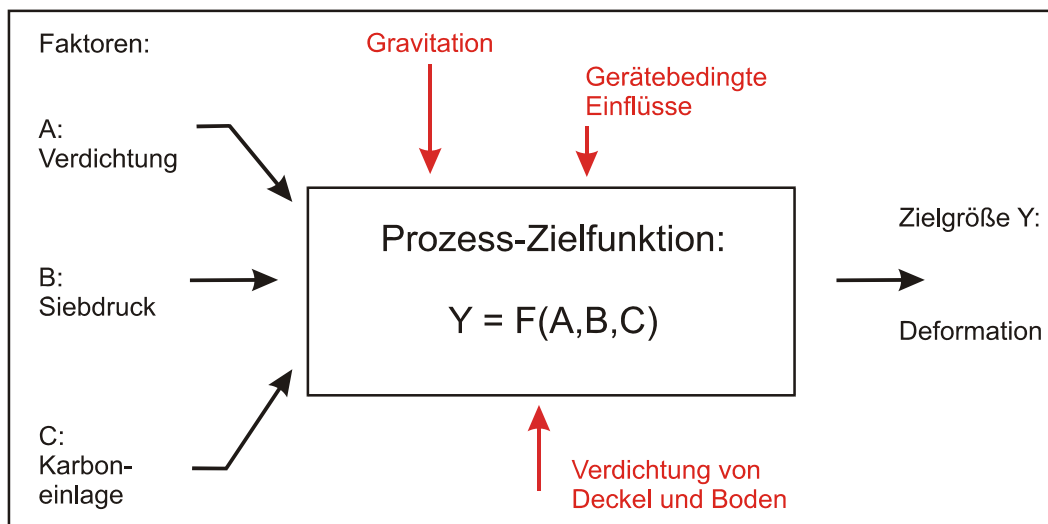


Bild 3-21: Einfluss- und Zielgrößen zur Deformationskontrolle an der Keramikbrücke.

Paste [WAG04]. Die Verdichtung an geprägten Brücken erzeugt eine zusätzliche Schwindungsdifferenz bezüglich der schwächer verdichteten Boden- und Deckelteile. Zusätzlich beeinflussen Gravitation und gerätebedingte Einflüsse wie Parallelitätstoleranzen der Presse das Prozessergebnis. Eine schematische Darstellung der Einflüsse zeigt Bild 3-21.

Ziel einer qualitätsgerechten Deformationskontrolle an funktionalisierten, freitragenden Keramikelementen muss die quantitative Beurteilung der einzelnen Einflüsse sein. Im folgenden Ansatz wird das Ziel verfolgt, die einzelnen Spannungseinflüsse zu kompensieren. Für Spannungsüberlagerungen gilt lineare Superposition. In diesem Fall bietet sich ein hochvermengtes Matrixexperiment zur Quantifizierung der Einzelanteile an.

3.7.2 Matrixexperiment zur Quantifizierung der Spannungseinflüsse

4 Versuche sind bei Verwendung eines hochvermengten Versuchsplans nach TAGUCHI ausreichend, um die Wirkung von 3 Faktoren auf eine Zielgröße zweistufig zu charakterisieren [KLE04]. Die oben betrachteten Einflüsse werden auf drei zu betrachtende Faktoren reduziert: die Verdichtung der freitragenden Brücke, ihre Bedruckung mit einer Siebdruckpaste und die Verwendung einer Karboneinlage beim Laminieren. Der Gravitationseinfluss beim Erweichen der Glasmatrix wird durch gleiche Positionierung beim Sintern konstant gehalten. Die Versuchsanordnung besteht aus 7 Lagen DP951, davon bilden jeweils drei nicht vorverdichtete Lagen DP951PX den Deckel bzw. Boden. Eine Lage DP951PT dient als freitragende Brücke (s. Bild 3-20). Diese Lage wird dem Versuchsplan in Tabelle 3-7 entsprechend verdichtet, bedruckt und während der Lamination mit einer Karboneinlage abgestützt.

Das Intervall der Verdichtung der freitragenden Brücke (Faktor A) wird zwischen unverdichtet entsprechend der Stufeneinstellung A_1 , und 50MPa entsprechend der Stufeneinstellung A_2 , festgesetzt. Die Brückenfolie mit einer Fläche von $85 \cdot 42\text{mm}$ wird bei Stufeneinstellung A_2 vollflächig mit einer Kraft von 180 kN in einer uniaxialen Presse /Weber/ bei 55°C für $4 \cdot 2\text{min}$ verdichtet. Nach jeweils zwei Minuten erfolgt eine Drehung der Anordnung um 90° , um Parallelitätsfehler zu minimieren.

Faktor B verkörpert die Bedruckung mit Siebdruckpaste. Die Stufeneinstellung B_1 entspricht einer unbedruckten Brücke. Im Versuch wird die Platinpaste DP9896 gewählt, die sich zur Herstellung von Heizelementen und temperaturempfindlichen Widerständen im Fluidsystem eignet. Strukturen mit einer Dicke von $10\mu\text{m}$ und einer Linienbreite von $100\mu\text{m}$ sowie einem Zwischenraum von $200\mu\text{m}$ sind über die gesamte Länge des freitragenden Bereiches gedruckt. Diese Anordnung entspricht der Stufeneinstellung B_2 .

Als Faktor C wird die Abstützung der Brücke durch eine Karboneinlage betrachtet. Dabei entspricht die Einstellung C_1 der Anordnung ohne und Einstellung C_2 mit Einlage. Im Versuch kommt die Karbonfolie HIGH PURITY CARBON TAPE TCS-CARB-1 der Firma HARMONICS INC. zum Einsatz, welche mit $254\mu\text{m}$ die gleiche Stärke wie die DP951PX-Folie hat. Alle Substrate werden bei 2MPa und 70°C uniaxial laminiert und anschließend nach dem Profil in Abschnitt A 1.1 gesintert. Pro Versuch werden jeweils

Tabelle 3-7: Planmatrix des Experimentes.

Exp. Nr.	Faktor A: Verdichtung	Faktor B: Paste	Faktor C: Karbon
1	ohne	ohne	ohne
2	ohne	mit	mit
3	mit	ohne	mit
4	mit	mit	ohne

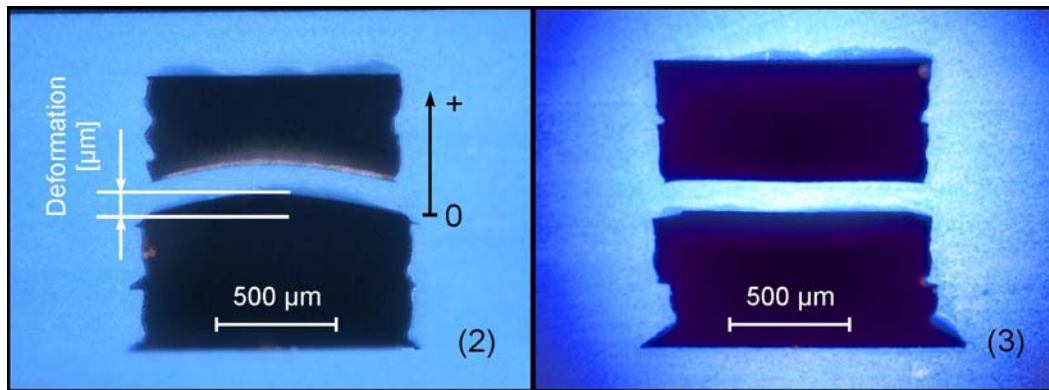


Bild 3-22: Freitragende Brücken, links deformierte Brücke (Versuch 2) und rechts kompensierte Brücke (Versuch 3).

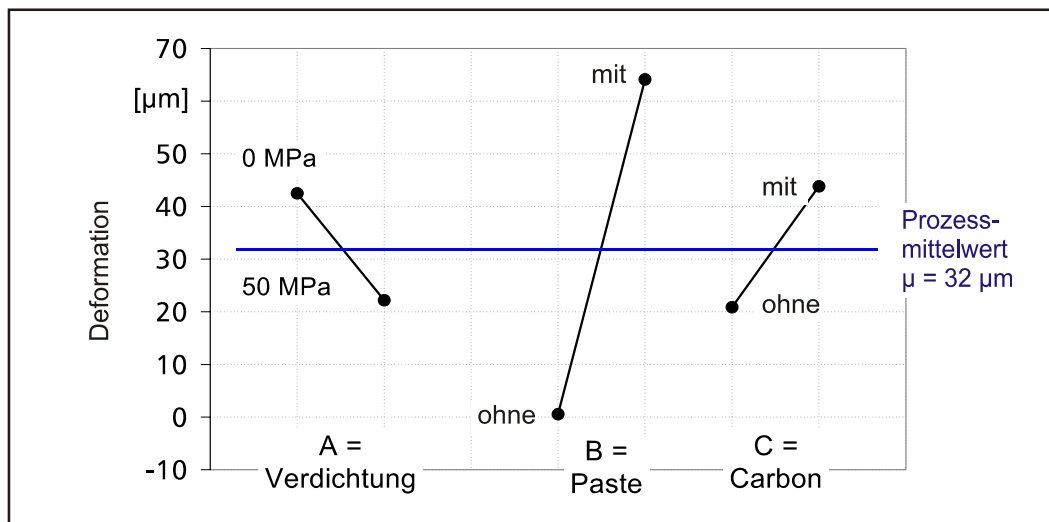


Bild 3-23: Faktorwirkungsdiagramm aus der Analyse der Echtwerte.

4 Brückenelemente ausgewertet. Bild 3-22 zeigt eine Brückenstruktur aus Versuch 2 und illustriert die Deformationsbestimmung am Mikroskop /Axiotech/. Die Auswertung erfolgt nach dem Algorithmus in [KLE04]. Aus der Mittelwertanalyse ergeben sich die Faktorwirkungen $A_{1,2} \dots C_{1,2}$. Sie sind als Faktorwirkungsdiagramm in Bild 3-23 grafisch dargestellt.

Aus der Varianzanalyse folgt, dass die Bedruckung mit der Paste DP9896 den größten Einfluss hat und eine starke Deformation in positiver Richtung (Aufwölben) bewirkt. Ursachen sind Schwindungsdifferenz und Differenz der thermischen Dehnungen von Paste und Keramik. Karboneinlagen bewirken ebenfalls eine Aufwölbung, ihr Einfluss ist jedoch schwächer. Die Verdichtung bewirkt eine negative Deformation (Durchhang).

3.7.3 Kompensation der Einflüsse

Eine quantitative Abschätzung der Deformation kann anhand der ermittelten Faktorwirkungen vorgenommen werden. Für ein Matrixexperiment nach oben beschriebenem Versuchsplan lautet die Zielfunktion F [SCH73]:

$$F = \mu + (A_{1,2} - \mu) + (B_{1,2} - \mu) + (C_{1,2} - \mu) \pm F_i \quad \text{GL 3-1}$$

Dabei steht μ für den Prozessmittelwert, der in diesem Experiment einer Aufwölbung von $32\mu\text{m}$ entspricht. F_i ist der zu erwartende Fehler und beträgt $12\mu\text{m}$. Mit den bekannten Faktorwirkungen können nach Gleichung 3-1 Vorhersagen für den zu erwartenden Mittelwert bei beliebigen Stufenkombinationen gemacht werden. Karboneinlage und Verdichtung bewirken jeweils ähnliche Änderungen in entgegengesetzter Richtung, wie aus dem Faktorwirkungsdiagramm deutlich wird. Ohne Strukturen auf der Brücke kann die durch die Verdichtung verursachte Deformation durch Lamination mit Karboneinlagen ausgeglichen werden, die Deformation nach Gleichung 3-1 stellt sich für diese Faktorkombination wie folgt dar:

$$F = 32\mu\text{m} + (A_2 - 32\mu\text{m}) + (B_2 - 32\mu\text{m}) + (C_1 - 32\mu\text{m}) \pm 12\mu\text{m} \quad (\text{GL 3-2})$$

Mit den Faktorwirkungen $A_2 = 22\mu\text{m}$, $B_1 = 0\mu\text{m}$ und $C_1 = 44\mu\text{m}$ aus der Mittelwertanalyse ergibt sich eine Aufwölbung von $2\mu\text{m}$ mit einer erwarteten Abweichung von $\pm 12\mu\text{m}$. Eine mit dieser Einstellung gefertigte Brücke zeigt Bild 3-22 rechts. Die verdichtete Lage spannt sich ohne Deformation über dem Kanal auf. Das Ergebnis verdeutlicht, dass eine gezielte Kompensation der Spannungen durch entgegen gerichtete Komponenten vorgenommen werden kann und die Versuchsdurchführung unter Nutzung hochvermenger Matrixexperimente für derartige Prozessanalysen geeignet ist. Die durch die Verdichtung hervorgerufen Deformation ist vollständig kompensiert.

4 MIKROFORMUNG DURCH PRÄGEN

4.1 Vorüberlegungen

4.1.1 Einordnung der Versuche

Bisher wird der Prägevorgang als BLACK BOX in der Prozesskette betrachtet und durch definierte Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen beschrieben, ohne dabei auf lokale Umordnungsprozesse und die Strukturformung beim Prägen und Sintern einzugehen. Layoutgrößen, Werkzeuggeometrie und Werkstoff bestimmen das Prägeergebnis. Die Untersuchung dieser verschiedenen Einflüsse auf den Formgebungsprozess ist Gegenstand dieses Kapitels.

Die Grundlagen zum Verständnis des Prägevorgangs bilden die Spannungsverteilung im Prägeteil und Skalierungseffekte. Umformtechnische Grundlagen sind in Abschnitt 1.4 zusammengefasst. Zur analytischen Beschreibung der Abformung werden im Rahmen dieser Arbeit dimensionslose Verhältnissgrößen definiert. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 ermittelten Materialeigenschaften werden maßgebende Werkstoffeigenschaften für verschiedenen Umformsituationen experimentell herausgearbeitet. Dabei dienen visioplastische Abformversuche an Kavitäten und Feinstrukturen der experimentellen Untersuchung lokaler Umordnungsprozesse. Anhand der Ergebnisse wird der Prägevorgang von LTCC-Folienanordnungen unter Berücksichtigung auftretender Effekte wie Materialumordnung, Verdichtung und Elastizität phänomenologisch beschrieben.

4.1.2 Spannungsverlauf bei uniaxialem Druck

Der in einen Grünkörper eingeleitete Prägedruck verteilt sich aufgrund der Reibung an der Matrizenwand und der inneren Reibung der Keramikmasse, wobei die innere Reibung eine entscheidende Rolle spielt. Es ergibt sich ein Spannungsgradient $\sigma_Z(z)$ in Stauchrichtung (z) gemäß der Beziehung [GAU01]:

$$\sigma_Z(z) = p_P \cdot e^{\frac{2\mu k}{R} z} \quad (\text{GL 4-1})$$

Hierin ist p_P der wirkende Prägedruck, μ der Reibkoeffizient und R die Stempelbreite der Presse. Die Druckübertragungsrate k zwischen Stempel und Werkstück beschreibt die Verluste an der Wandung. Der sich ergebende Spannungsverlauf in einem Keramikpressling bei einseitiger uniaxialer Druckbelastung ist qualitativ in Bild 4-1 dargestellt. Die Bereiche größter Spannung befinden sich im Randbereich des Stempels, in der Mitte sind die Spannungen am geringsten. Je größer die innere Reibung, desto größer sind Spannungsgradienten im Pressling. Hohe Aspektverhältnisse als Relation zwi-

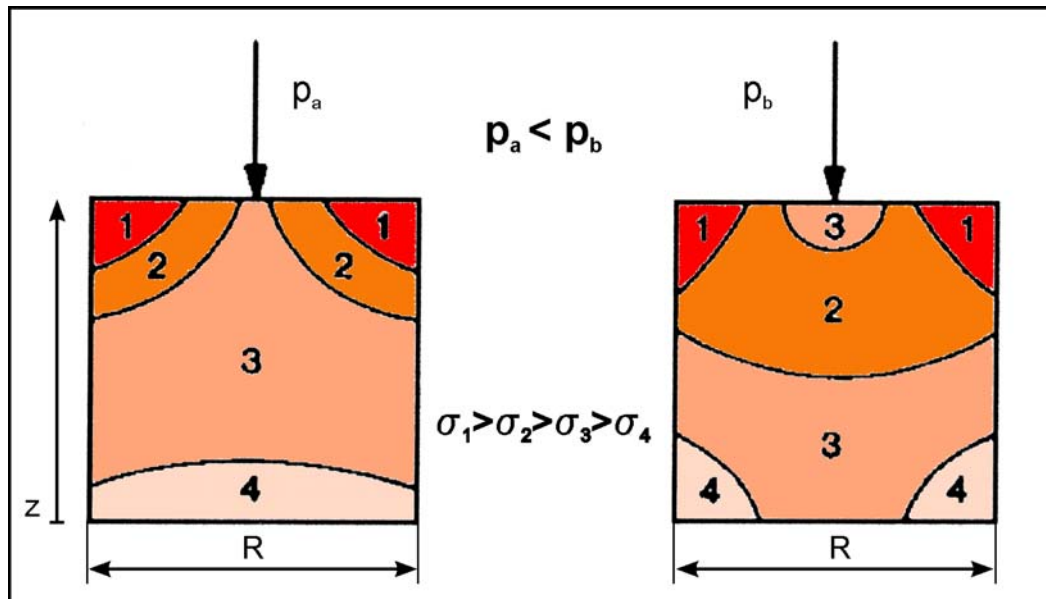


Bild 4-1: Spannungsverlauf in einem Keramikpressling bei uniaxialer Druckbelastung [GAU01, Seite 152].

schen Stempelbreite R und Werkstückhöhe Z bewirken ebenfalls große Spannungsgradienten und wirken sich somit ungünstig auf die Dichteverteilung im Grünkörper aus.

4.1.3 Ähnlichkeitsbetrachtungen

Die vorangegangenen Betrachtungen gelten für makroskopische Volumenkörper. Die Übertragung der Gesetzmäßigkeiten auf die Abformung im Mikrobereich erfordert weitere Überlegungen. Ähnlichkeitsbetrachtungen dienen dem Verständnis der Spannungsverhältnisse bei Skalierung der Dimensionen. Ein verkleinertes Original wird durch ein makroskopisches Modell abgebildet. Dabei werden der Kraftmaßstab m_F und Längenmaßstab m_L durch eine geeignete Relation, die Ähnlichkeitskennzahl, verknüpft. Der Kraftmaßstab m_F beschreibt das Verhältnis der Kraft am Original F zur Kraft am Modell \bar{F} und der Längenmaßstab m_L das Verhältnis der Geometrie am Original L zu der am Modell \bar{L} :

$$m_F = \frac{F}{\bar{F}} \quad m_L = \frac{L}{\bar{L}} \quad (\text{GL 4-2})$$

Bei der Umformung von Mikrostrukturen sind drei Ähnlichkeitskennzahlen zu berücksichtigen. Plastostatische Ähnlichkeit leitet sich aus der Fließbedingung ab und definiert das Verhältnis zwischen aufzubringender Spannung und Materialfestigkeit. Es gilt nach [KOP98, Seite 302]:

$$m_F = m_L^2 \times \frac{k_f}{\bar{k}_f} \quad (\text{GL 4-3})$$

Daraus folgt die Ähnlichkeitskennzahl K_{PL} für plastostatische Ähnlichkeit:

$$K_{PL} = \frac{F}{L^2 \cdot k_f} = \frac{\bar{F}}{\bar{L}^2 \cdot \bar{k}_f} \quad (\text{GL 4-4})$$

In der Gleichung beschreibt k_f die Fließspannung des Originals und \bar{k}_f die des Modells. Die Kennzahl K_{pl} dient der Modellierung von Umformprozessen. Die mathematische Beziehung macht deutlich, dass Materialien austauschbar sind, wenn die Umformkraft der ihrer jeweiligen Fließspannung angepasst wird.

Elastische Formänderungen werden durch das HOOKSCHE Gesetz beschrieben. Es bildet den Ansatz für die elastostatische Ähnlichkeit. Der Elastizitätsmodul E und der Schubmodul G definieren das Verhältnis von Kraftmaßstab m_F zum Längenmaßstab m_l . Die Beziehung lautet gemäß [KOP98, Seite 302]:

$$m_F = m_l^2 \cdot \frac{E}{\bar{E}} = m_l^2 \cdot \frac{G}{\bar{G}} \quad (\text{GL 4-5})$$

Daraus folgen die Kennzahlen K_E für den E-Modul und K_G für den Schubmodul:

$$K_E = \frac{F}{L^2 \cdot E} = \frac{\bar{F}}{\bar{L}^2 \cdot \bar{E}} \quad \text{und} \quad K_G = \frac{F}{L^2 \cdot G} = \frac{\bar{F}}{\bar{L}^2 \cdot \bar{G}} \quad (\text{GL 4-6})$$

Wie bei der plastostatischen Ähnlichkeit skaliert der Längenmaßstab der elastischen Kennzahlen quadratisch. Da die Elastizität beim Umformen von LTCC-Folien nicht vernachlässigbar ist, erfordert die Modellbildung die Verwendung von Materialien mit einem Verhältnis von Elastizitätsmoduln und Fließspannung in einer Größenordnung.

Die Reibung an der Matrizenwand wird für Werkstoffpaarungen, deren Fließspannungen k_f sich um mehr als eine Größenordnung unterscheiden bei hoher Normalspannung mit dem Reibfaktormodell beschrieben [DAH93, Seite 126]. Dieses Modell ist auf die vorliegende Werkstoffpaarung anwendbar. Ihm liegt die Vorstellung zu Grunde, dass die Reibpartner aneinander haften und der weichere Partner, hier die Grünfolie, abgeschert wird. Bild 4-2 veranschaulicht den Unterschied zum Reibkoeffizientenmodell. Der Reibfaktor m ist der Proportionalitätsfaktor zwischen herrschender Reibschubspannung τ_R und der Schubfließspannung τ_F als Belastungsgrenze des Materials. Er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Das Modell erlaubt eine von der Normalspannung unabhängige Betrachtung. Der Reibfaktor des Modells wird mit \bar{m} bezeichnet. Nach [KOP98, Seite 305] leitet sich damit das Modellgesetz für die Ähnlichkeit der Reibung nach folgender Beziehung ab:

$$m_F = m_l^2 \frac{k_f}{\bar{k}_f} \cdot \frac{m}{\bar{m}} \quad (\text{GL 4-7})$$

Es folgt die Kennzahl für die Ähnlichkeit der Reibung K_R :

$$K_R = m = \bar{m} \quad (\text{GL 4-8})$$

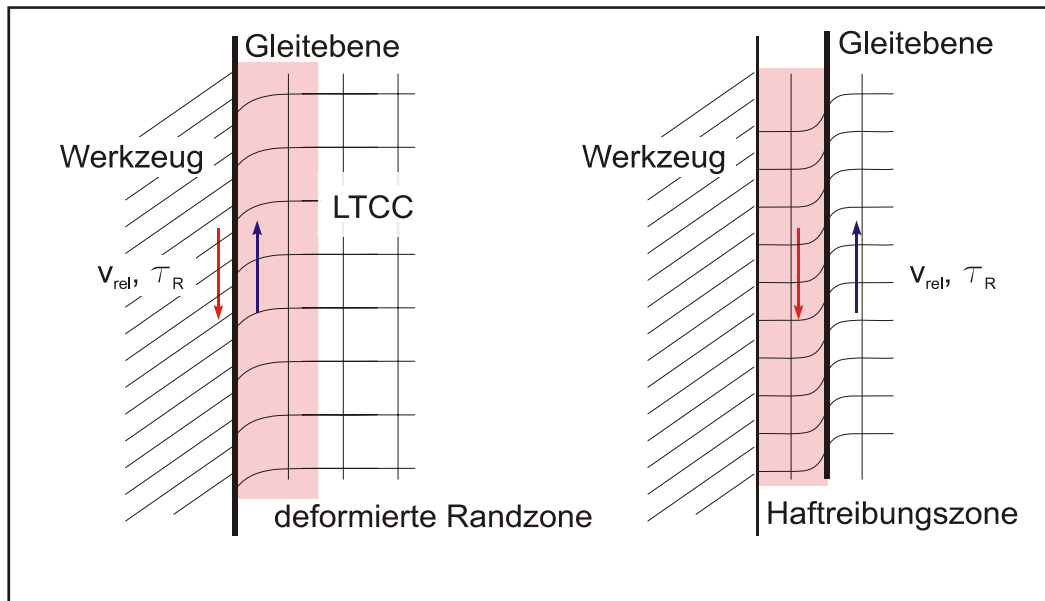


Bild 4-2: Deformation an der Matrizenwand aufgrund der Reibung, links Abgleiten an der Werkzeugwand, rechts Abgleiten an der Schubspannungsebene.

Die Reibung ist unabhängig von der Strukturgröße. Daher müssen Schmierung und Oberflächenbeschaffenheit besonders beim Abformen von Feinstrukturen berücksichtigt werden. Die bisherigen Ableitungen konnten der Literatur entnommen werden. Die Verdichtung des Folienmaterials ist in bekannten Quellen nicht berücksichtigt. Das Stoffgesetz ist durch die Kompressibilität in Gleichung 1-20 gegeben. Daraus wird hier die Ähnlichkeitsbeziehung für die Verdichtung abgeleitet. Die Abhängigkeit der Verdichtung von der Kraft lautet:

$$F = \frac{L^2}{k} \quad \text{und} \quad \bar{F} = \frac{\bar{L}^2}{\bar{k}} \quad (\text{GL 4-9})$$

Darin ist k die Kompressibilität des Originals und \bar{k} die des Modells. Durch Einsetzen in Gleichung 4-2 folgt die Beziehung für den Kraftmaßstab:

$$m_F = m_l^2 \frac{\bar{k}}{k} \quad (\text{GL 4-10})$$

Damit ergibt sich die Ähnlichkeitskennzahl für die Verdichtung K_{VD} :

$$K_{VD} = \frac{F \cdot k}{L^2} = \frac{\bar{F} \cdot \bar{k}}{\bar{L}^2} \quad (\text{GL 4-11})$$

Für ähnliche Abformverhältnisse müssen plastische und elastische sowie Verdichtungseigenschaften ähnlich sein. Da sowohl Verdichtung als auch elastostatische und plastostatische Wirkungen quadratisch mit abnehmender Strukturgröße nachlassen, überwiegen bei kleinen Strukturen die dimensionsunabhängigen Reibungseffekte.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

4.2.1 Layoutbeschreibung und Umformwiderstand

Das Abformverhalten wird anhand eines möglichst einfachen, gut vermessbaren Testlayouts untersucht. Horizontale, d.h. in der Substratebene liegende, und vertikale, d.h. senkrecht zur Substratebene liegende Geometrien, sind so gestaltet, dass sie einfach mit einem Profilometer erfasst werden können. Eine Draufsicht zur Erläuterung der horizontalen Größen zeigt Bild 4-3. Der Entwurf enthält Strukturbereiche mit der Länge L und der Breite X , die als Kavitäten und Feinstrukturen ausgeführt sind. Die Feinstrukturen bestehen aus mit der Periode P wiederkehrenden Linien der Breite W , die durch Stege der Breite B getrennt sind. In definiertem Abstand von den unterschiedlich großen Strukturbereichen sind geprägte Abstandsmarken vorgesehen, die der Vermessung horizontaler Dimensionsänderungen nach den einzelnen Pro-

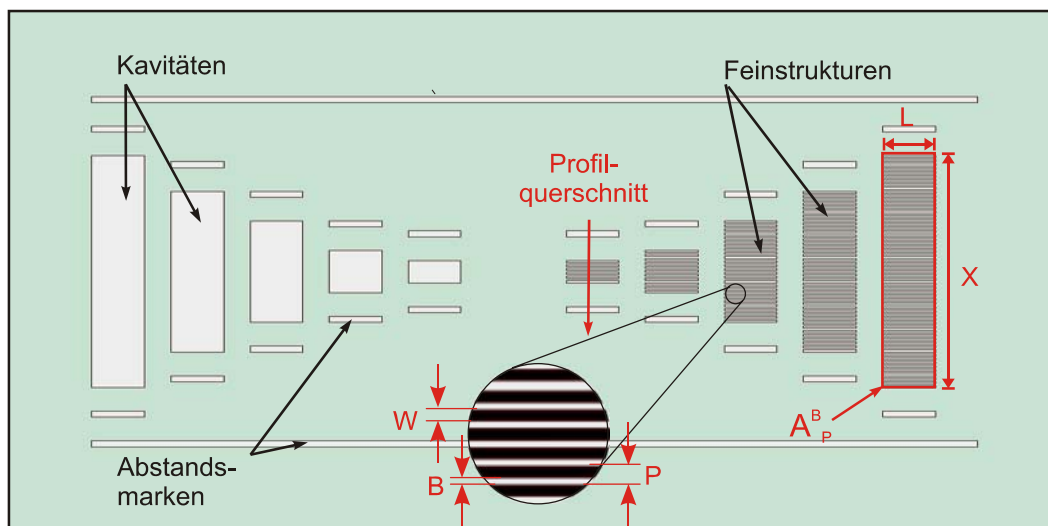


Bild 4-3: Definition der Flächengrößen an Prägewerkzeugen.

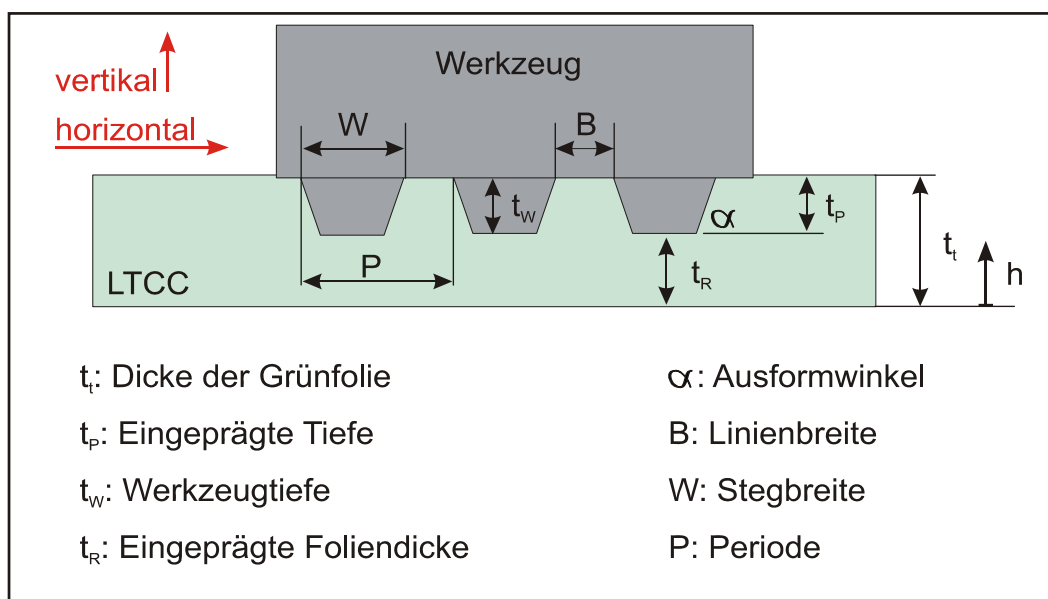


Bild 4-4: Profilquerschnitt durch das Prägewerkzeug.

zessschritten dienen. Eine weitere Positionsmarke mit konstantem Abstand befindet sich am Rand des Prägestempels.

Die Strukturdichte D_S der Strukturbereiche ergibt sich aus dem Verhältnis der Linienbreite W zur Periode P :

$$D_S = \frac{W}{P} = \frac{W}{B + W} \quad (\text{GL 4-12})$$

Kavitäten haben eine Strukturdichte von 1. Die notwendige Prägekraft wird durch die Flächenverhältnisse der einzuprägenden Struktur auf dem Werkzeug bestimmt und nach Gleichung 2-7 berechnet. Die wirksame Projektionsfläche eines Strukturbereiches A_P^B beträgt:

$$A_P^B = X \cdot L \cdot D_S \quad (\text{GL 4-13})$$

Die Projektionsfläche A_P in Gleichung 2-7 ergibt sich damit als Fläche des gesamten erhabenen Werkzeugbereiches:

$$A_P = \sum_i A_P^{Bi} \quad (\text{GL 4-14})$$

Bild 4-4 zeigt einen schematischen Querschnitt durch das Werkzeug. Die Linienbreite W entspricht der Breite des Werkzeuges am Fuß der erhabenen Struktur, die Stegbreite B entspricht der Breite des Zwischenraumes. Die Flanken des Werkzeuges bilden den Ausformwinkel α . Weitere Geometrie Größen sind die Werkzeugtiefe t_W und die Foliendicke t_f .

Anhand der Werkzeuggeometrie kann der Umformwiderstand k_w nach [KOP98, Seite 151] berechnet werden. Die Beziehung beschreibt eine momentane, lokale Umformsituation und lautet für den ebenen Betrachtungsfall unter Verwendung der oben definierten Größen:

$$k_w = k_f \left(1 + \frac{\mu}{2} \cdot \frac{W}{h} \right) \quad (\text{GL 4-15})$$

Die Variable h ist der Momentanwert der eingeprägten Foliendicke, sie entspricht t_t am Beginn des Prägeprozesses und t_R am Ende. Die Variable μ ist der Reibfaktor. Unter Annahme einer konstanten Fließspannung k_f während des Prozesses, d.h. dass keine Verfestigung aufgrund der Verdichtung auftritt, beträgt der mittlere Umformwiderstand k_{wm} (vgl. Bild 2-16) als Prozeßmittelwert für den Prägeschritt:

$$k_{wm} = k_f \left(1 + \frac{\mu}{2} \cdot \frac{2W(t_t + t_R)}{t_t \cdot t_R} \right) \quad (\text{GL 4-16})$$

Zur analytischen Beschreibung der Geometrieinflüsse werden hier dimensionslose Verhältnisgrößen vorgeschlagen, die bei vergleichbaren Reibungsbedingungen eine

aussagekräftige Grundlage zum Verständnis der Abformung bilden. Diese Größen werden im Folgenden definiert.

Das vertikale Prägeverhältnis V_P^V wird aus dem Verhältnis von Werkzeugtiefe t_W zu Foliendicke t_t bestimmt und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an:

$$V_P^V = \frac{t_W}{t_t} \quad (\text{GL 4-17})$$

Analog wird das Verhältnis zwischen Linienbreite W und Foliendicke t_t als horizontales Prägeverhältnis V_P^H definiert:

$$V_P^H = \frac{W}{t_t} \quad (\text{GL 4-18})$$

In Abschnitt 4.1.2 wurde bereits verdeutlicht, dass diese Relationen maßgeblichen Einfluss auf die Spannungsverteilung haben. Zur Beschreibung der Abformung an periodisch wiederkehrenden Strukturen wird das horizontale Strukturverhältnis V_S^H eingeführt und wie folgt definiert:

$$V_S^H = \frac{P}{t_t} = V_P^H \cdot D_S \quad (\text{GL 4-19})$$

Seine Werte liegen zwischen 0 und 1, wobei 1 einer vollflächig geprägten Kavität entspricht. Der mittlere Umformwiderstand kann nach Einsetzen von Gleichung 4-17 und Gleichung 4-18 in Gleichung 4-16 als Funktion des Reibkoeffizienten μ und dieser Prägeverhältnisse angegeben werden:

$$k_{wm} = k_f \left(1 + \frac{2}{6} \cdot \mu \cdot \frac{V_P^H (2 - V_P^V)}{(1 - V_P^V)} \right) \quad (\text{GL 4-20})$$

Unter der Annahme konstanter Reibungsverhältnisse ist demnach der Umformwiderstand der Anordnung nur von der prozessabhängigen Fließspannung und der Geometrie abhängig. Das vertikale Prägeverhältnis hat durch den Term im Nenner einen starken Einfluss auf den mittleren Umformwiderstand k_{wm} , während das horizontale Prägeverhältnis lediglich linear eingeht. An periodisch wiederkehrenden Feinstrukturen kann unter Berücksichtigung von Gleichung 4-19 das horizontale Prägeverhältnis durch das Strukturverhältnis V_S^H und die Strukturdichte D_S ausgedrückt werden:

$$k_{wm} = k_f \left(1 + \frac{2}{9} \cdot \mu \cdot \frac{V_S^H D_S (2 - V_P^V)}{(1 - V_P^V)} \right) \quad (\text{GL 4-21})$$

Diese Gleichungen setzen eine vollständige Stegabformung voraus. Die Linearisierung ist für kleine Reibfaktoren zulässig, anderenfalls muss die Spannungsverteilung gemäß der Exponentialfunktion in Gleichung 4-1 berücksichtigt werden. Prägeverhältnisse und Strukturverhältnis dienen der dimensionslosen Layoutbeschreibung.

4.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Visioplastische Versuche tragen zum Verständnis des Stofftransportes und somit des Prägevorgangs bei. Beim Prägen von LTCC-Folien erzeugen Siebdruckschichten zwischen den Folienlagen horizontale Muster, welche im Querschliff gut sichtbar sind und damit lokale Verformungen visualisieren. Da das Folienmaterial DP951 in geringer Dicke von 50 µm verfügbar ist, werden aus dieser Folie visioplastische Schliffe präpariert, um Geometrieinflüsse auf die Materialverteilung zu betrachten. Die mit der Silberpaste DP6142D vollflächig bedruckten Einzellagen DP951C2 werden gestapelt und bei 57°C mit einem Druck von 100 MPa geprägt. Anschließend werden aus einem Teil der Proben Querschliffe im Grünzustand präpariert, die übrigen werden gesintert und ebenfalls im Querschliff präpariert. Das vertikale Prägeverhältnis an Kavitäten und Feinstrukturen wird durch Verwendung unterschiedlicher Lagenanzahl variiert. Werkzeuge mit unterschiedlicher Periode und Strukturdichte werden verwendet, um den Einfluss dieser Geometriegrößen zu untersuchen. Der Einfluss der Reibung wird betrachtet, indem ausgewählte Proben bei der Abformung mit Leinöl benetzt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Ergänzend werden abgeformte Profile mit einem Profilometer /FRT/ im TTV-Modus (TOTAL THICKNESS VARIANCE) vermessen, um die Werkzeuggeometrien mit den geprägten und nach dem Sintern resultierenden Strukturgeometrien zu vergleichen. Dazu wird die Oberfläche des Prüflings gleichzeitig von zwei zueinander justierten Sensoren nach dem Weißlichtinterferometerverfahren abgetastet und die Differenz als absolute Dicke aufgezeichnet. Die Vermessung erfolgt am Werkzeug sowie jeweils nach dem Prägen und Sintern an der Keramik. Neben dem Abformergebnis kann so der Verdichtungseinfluss beurteilt werden.

Die Dimensionsänderungen zwischen den einzelnen Prozessschritten werden ebenfalls durch Verhältnissgrößen beschrieben, welche in Bild 4-5 nach Prozessposition und Geo-

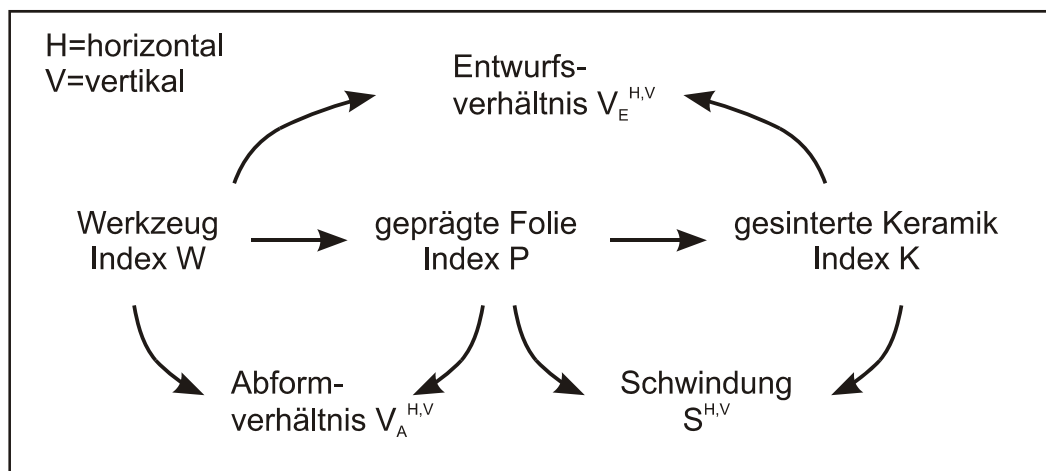


Bild 4-5: Dimensionslose Beschreibungsgrößen im Prozessablauf.

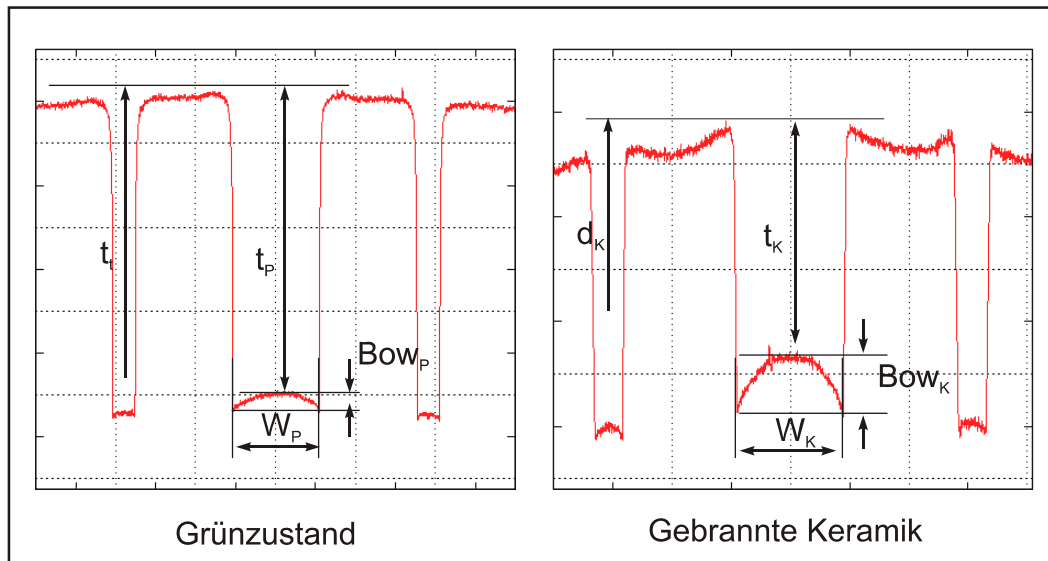


Bild 4-6: Ermittlung der Geometrie Größen an Kavitäten aus dem Profilverlauf.

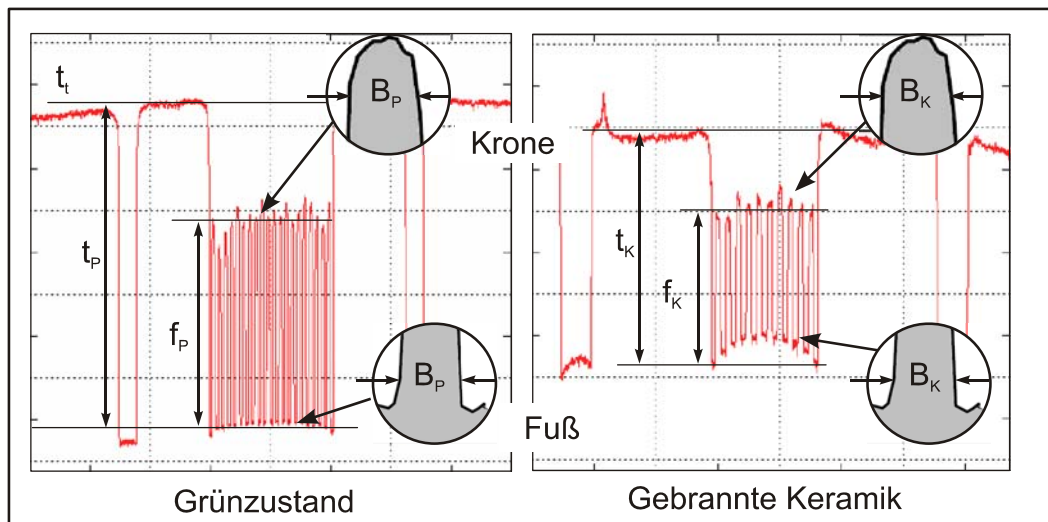


Bild 4-7: Ermittlung der Geometrie Größen an Feinstrukturen aus dem Profilverlauf.

metrie geordnet sind. Je nach Prozessstufe wird die jeweilige Geometrie mit W für Werkzeug, P für den geprägten Zustand und mit K für die gebrannte Keramik indiziert. Der hochgestellte Index unterscheidet Maße in vertikaler oder horizontaler Richtung. Bild 4-6 und Bild 4-7 veranschaulichen die Ermittlung der Größen aus den Profilkurven. Der Folienstapel mit der Gesamtdicke t_l hat nach dem Sintern die Dicke d_k . Die Werkzeughöhe t_w im Verhältnis zur erreichten Prägetiefe t_p im Grünzustand wird als vertikales Abformverhältnis V_A^V bezeichnet:

$$V_A^V = \frac{t_p}{t_w} \cdot 100 \% \quad (\text{GL 4-22})$$

Dieser Kennwert beschreibt die Abformqualität von Kavitäten in der Grünfolie. Der Idealwert von 1 entspricht einer 100%-igen Abbildung des Werkzeuges. Abweichun-

gen ergeben sich durch elastische Effekte. In horizontaler Richtung wird das horizontale Abformverhältnis V_A^H wie folgt definiert:

$$V_A^H = \frac{w_P}{w_W} \cdot 100 \% \quad (\text{GL 4-23})$$

Eine dimensionslose Beschreibungsgröße für die nach dem Sintern erreichte Werkzeugabbildung als Verhältnis von Werkzeuggeometrie und Keramikgeometrie ist das Entwurfsverhältnis V_E . In vertikaler Richtung wird es aus Werkzeuggeste t_W und tatsächlich erreichter Kavitätstiefe t_K bestimmt:

$$V_E^V = \frac{t_K}{t_W} \cdot 100 \% \quad (\text{GL 4-24})$$

Analog beschreibt das horizontale Entwurfsverhältnis V_E^H die Abbildung der Kavität nach dem Sintern:

$$V_E^H = \frac{w_P - w_K}{w_K} \cdot 100 \% \quad (\text{GL 4-25})$$

An Feinstrukturen ist eine weitere Kenngröße erforderlich, da schmale Stege nicht immer vollständig gefüllt werden (s. Abschnitt 3.3). Zur Beschreibung wird das Füllverhältnis V_F eingeführt:

$$V_F = \frac{f_P}{t_W} \cdot 100 \% \quad (\text{GL 4-26})$$

Die Abformung von Feinstrukturen wird betrachtet, indem Stege jeweils am Fuß und der Krone (vgl. Bild 4-7) mit den Werkzeugmaßen verglichen werden. Aus diesen Daten werden die lokalen Werte der Schwindung sowie des Entwurfs- und Abformverhältnisses ermittelt.

4.2.3 Abformung von Kavitäten

Kavitäten in keramischen Mehrlagensubstraten dienen beispielsweise der Montage von Chips an Außenflächen oder als Funktionshöhlräume vergrabener fluidischer Bauteile im Substrat. Die horizontalen Abmessungen sind groß bezogen auf die Prägetiefe, das horizontale Prägeverhältnis ist größer als 1. Die Formgebung wurde anhand von Beispielgeometrien mit einer Breite w_W von 1,1 mm bzw. 300 μm und einer Werkzeuggeste t_W von 80 μm untersucht. Bild 4-8 zeigt Schliffbilder der Abformung in unterschiedlich dicke Folienstapel aus DP951 C2.

Es wird deutlich, dass der Materialtransport hauptsächlich am Rand der Kavität stattfindet. Es treten elastische Verformungen auf, erkennbar an der horizontalen Aufwölbung. Bei der zweilagigen Anordnung zeigt die Grünfolie aufgrund der Belastung stressbedingte Verzerrungen. Die dreilagige Anordnung ist bereits besser abgeformt. Die 300- μm -Kavität verwölbt sich deutlich aufgrund elastischer Deformationen, die

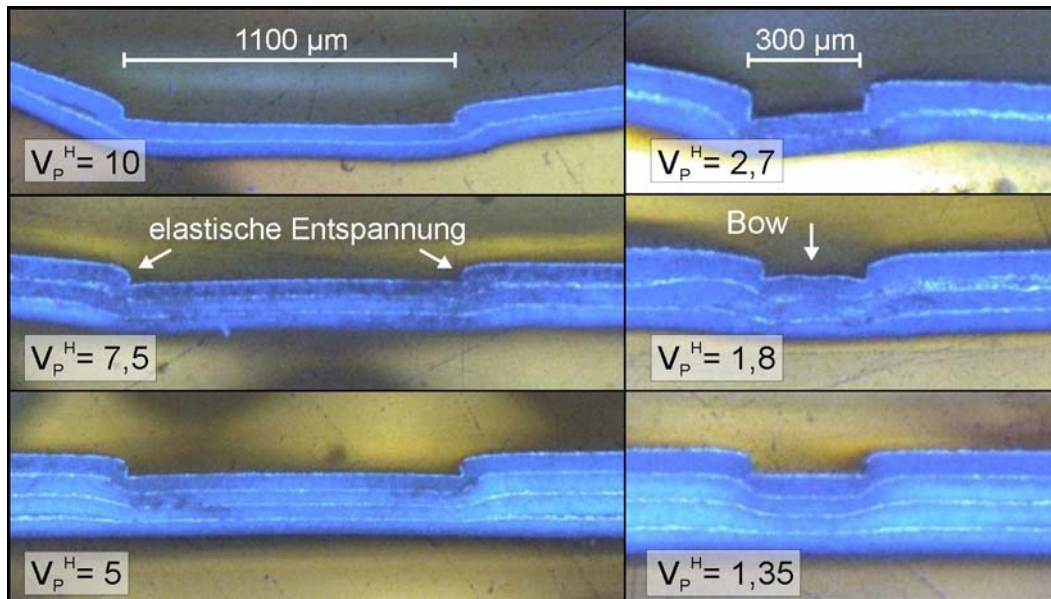


Bild 4-8: Schliffbilder zum Einfluss von Prägeverhältnis auf die Abformung von Kavitäten.

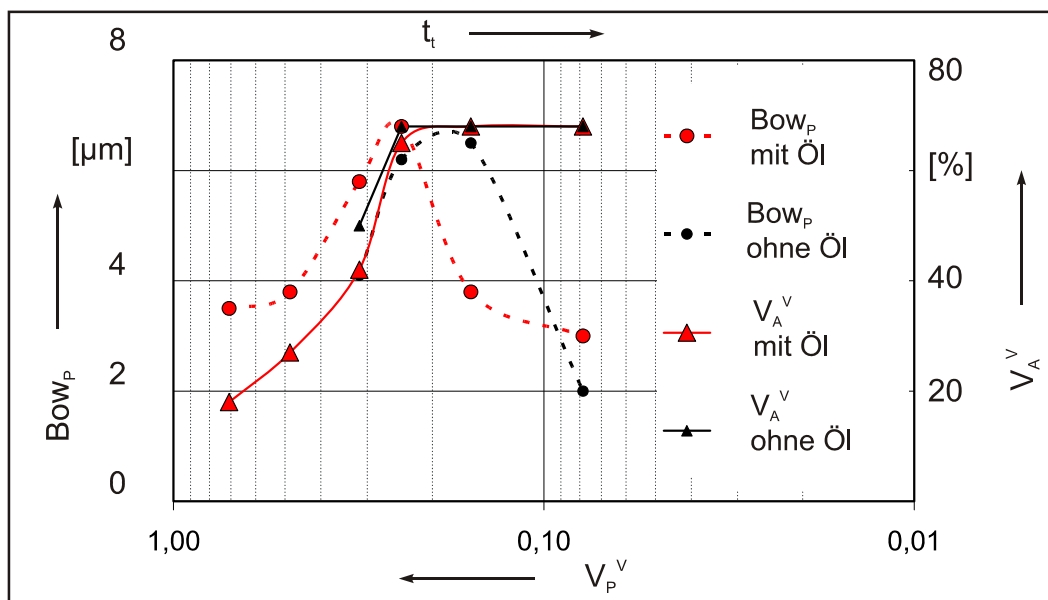


Bild 4-9: Abhängigkeit von Abformverhältnis und Ausbauchung (Bow) vom vertikalen Prägeverhältnisses und vom Schmierzustand für geprägte Kavitäten in DP951.

Ausbauchung (Bow) ist hier deutlich unter dem Mikroskop erkennbar. Das Material wird bis zu 200μm in die umgebende Grünfolie hinein verformt. In der 4-lagigen Anordnung ist die Kavität gut abgeformt. Es ist keine Ausbauchung am Schliffbild feststellbar, die durch das Prägen verformte Randzone hat eine Breite von ca. 100μm.

Die lokale Schwindung wird mit dem Profilometer /FRT/ an definierten Messstellen ermittelt. Zunächst werden Ausbauchung und vertikales Abformverhältnis in Abhängigkeit vom Schmierzustand für DP951 betrachtet. Die Ergebnisse sind Bild 4-9 in Diagrammform dargestellt. Die Ausbauchung zeigt in beiden Fällen ein deutliches Maximum vor Erreichen des maximalen Abformverhältnisses. Dieses beträgt hier 90%

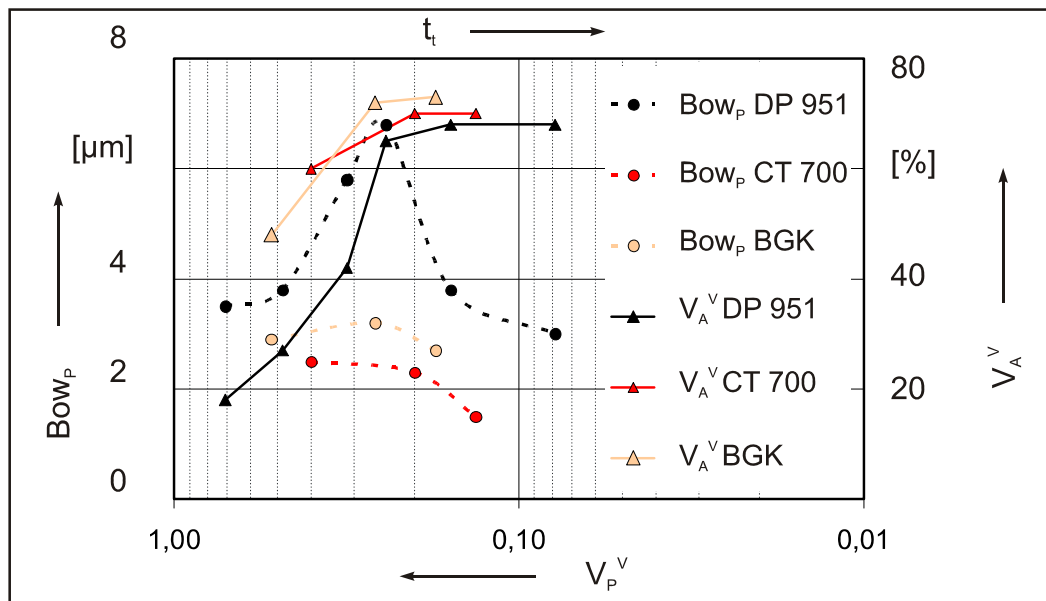


Bild 4-10: Abhängigkeit von Abformverhältnis und Ausbauchung (Bow) vom vertikalen Prägeverhältnis beim Prägen in verschiedene LTCC-Grünfolien.

und stellt sich bei Anwendung von Öl bei einem vertikalen Prägeverhältnis von 0,4 und ohne Öl bei 0,25 ein. Das Maximum ist bei Verwendung von Öl schärfer ausgeprägt.

Die Ausbauchung ist auf elastische Verformungen zurückzuführen. Bei großem vertikalem Prägeverhältnis verhindert der große Umformwiderstand das Fließen. Dünne Folienanordnungen werden daher vorwiegend elastisch verformt. Sinkt der Umformwiderstand bei Verwendung einer dickeren Anordnung, kann das Material vom Rande beginnend fließen. Der Anteil der plastischen Deformation steigt, bis das maximale vertikale Abformverhältnis erreicht ist. Bis zum Abformen der vollen Werkzeuggestiefe finden in der Mitte noch vermehrt elastische Verformungen statt. Erst bei ausreichender Foliendicke ist der Umformwiderstand gering genug, um einen gleichmäßigen Stofftransport auch in der Kavitätsmitte zu erlauben. Die Reibung führt zu verminderter Kraftübertragung zwischen Werkzeug und Folie (s. Gleichung 4-1). Die damit verbundene Reduktion der Deformationsarbeit w_D bewirkt einen verminderten Umformgrad (s. Gleichung 1-31), da die Elastizität unverändert bleibt. Dadurch wächst der elastische Anteil der Verformung relativ zum Umformanteil.

Der Einfluss von Materialeigenschaften wie Elastizität, Fließverhalten und Verdichtbarkeit wird anhand unterschiedlicher LTCC-Folien betrachtet. Es werden zusätzlich zu DP951 die in Abschnitt 2.1 ausgewählten Vergleichsfolien BGK und CT700 wie oben beschrieben geprägt und der Einfluss des Prägeverhältnisses auf die Ausbildung von Kavitäten unter Verwendung von Öl als Schmiermittel untersucht. Ausbauchung (Bow) und Abformverhältnis sind in Bild 4-10 dargestellt. Die maximale Ausbauchung fällt bei CT700 und BGK moderater aus als bei DP951. Dies ist durch die höhere Verdichtbarkeit beider Folien (vgl. Abschnitt 2.5) erklärbar. Das vertikale Prägeverhältnis muss bei allen drei Folien kleiner als 0,25 sein, um die Kavität maximal abzuformen.

Das maximale vertikale Abformverhältnis beträgt für DP951 90%, für CT700 93% und für BGK 97%.

Die bisherigen Daten lassen keine Rückschlüsse auf den Anteil der Verdichtung an der Abformung zu. Erst die Vermessung der Geometrie nach dem Sintern gibt Aufschluss darüber, welche plastische Verformung tatsächlich auftritt. Die horizontalen und vertikalen Schwindungen an der Kavität werden wie folgt aus den Profilometermesswerten ermittelt:

$$S^H = \frac{W_P - W_K}{W_P} \cdot 100\% \quad (\text{GL 4-27})$$

$$S^V = \frac{(t_t - d_K) - (t_t - t_P)}{(t_t - t_P)} \cdot 100\% \quad (\text{GL 4-28})$$

Die Entwurfsverhältnisse werden nach Gleichung 4-24 bzw. Gleichung 4-25 berechnet. Sie sind wie die erreichte Grubentiefe t_K für verschiedene Prägeverhältnisse in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Zunächst werden die horizontalen Schwindungen betrachtet. Die Standardabweichung der visuellen Wertablesung aus dem Profil (s. Bild 4-6) beträgt in vertikaler Richtung $9,25\text{ }\mu\text{m}$, dies entspricht einem mittleren quadratischen Fehler von $3\text{ }\mu\text{m}$ bei jeweils 9 Ablesungen. Der Fehler ist hauptsächlich durch die optische Flankenerfassung des Messgerätes bedingt. Die gemessene Kavitätsweite beträgt für alle Folien im Mittel $1100\text{ }\mu\text{m}$ mit einer maximalen Abweichung von $8\text{ }\mu\text{m}$. Dies zeigt, dass das Entwurfs-

Tabelle 4-1: Verhältnisgrößen an Kavitäten für verschiedene LTCC-Folien und vertikale Prägeverhältnisse.

Material (t_t [μm])	V_P^V [1]	V_E^H [%]	S^V [%]	t_K [μm]	V_E^V [%]
DP951 (330 μm)	0,24	11,7	10,9	35	44
DP951 (508 μm)	0,16	11,7	13,0	40	50
DP 951 (1016 μm)	0,08	11,3	15,5	46	57
CT700 (300 μm)	0,26	17,0	19,7	36	45
CT700 (450 μm)	0,18	17,2	22,4	40	50
BGK (220 μm)	0,36	15,2	15,4	41	51
BGK (330 μm)	0,24	16,1	17,0	43	54

maß mit hoher Genauigkeit abgebildet wird. Nach dem Sintern beträgt die durchschnittliche Weite $972\text{ }\mu\text{m}$ für DP951, $926\text{ }\mu\text{m}$ für BGK und $909\text{ }\mu\text{m}$ für CT700, die Messwerte weichen maximal $10\text{ }\mu\text{m}$ vom Mittelwert ab. Dies entspricht in etwa der oben angegebenen Ableseunsicherheit. Es ist keine signifikante Abhängigkeit der horizontalen Kavitätsgröße vom vertikalen Prägeverhältnis feststellbar. Die horizontalen Entwurfsverhältnisse sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die Genauigkeit der Kavität in horizontaler Richtung wird durch das Werkzeug und die Schwindungstoleranz bestimmt.

Die Ablesegenauigkeit in vertikaler Richtung wird durch die Standardabweichung von $1,3\text{ }\mu\text{m}$ abgeschätzt, dies entspricht einem mittleren quadratischen Fehler von $0,4\text{ }\mu\text{m}$ bezogen auf 9 Ablesungen. Ableseungenauigkeiten werden vor allem durch die Rauheit des Profils verursacht. Alle vertikalen Werte in Tabelle 4-1 zeigen eine signifikante Abhängigkeit vom vertikalen Prägeverhältnis. Aus Bild 4-10 geht hervor, dass das maximale vertikale Abformverhältnis bei vertikalen Prägeverhältnissen um 0,25 erreicht wird. Dies entspricht bei der gewählten Werkzeuggestiefe von $80\text{ }\mu\text{m}$ in etwa einer Foliendicke von $320\text{ }\mu\text{m}$. Aus dem Vergleich der Kavitätstiefen bzw. Entwurfsverhältnisse der verschiedenen Grünfolien bei dieser Dicke wird deutlich, dass in BGK die besten Ergebnisse hinsichtlich der Werkzeugabbildung nach dem Sintern erzielt werden. Dieses Material zeichnet sich neben einer hohen Verdichtbarkeit (vgl. Bild 2-33) durch eine geringe spezifische Staucharbeit aus (siehe Bild 2-22). Die lokale vertikale Schwindungsrate in der Kavitätsmitte ist höher als der im Laborversuch ermittelte Vergleichswert (s. Abschnitt 2.2) und weist auf eine erhöhte Verdichtung hin.

Die Tiefe der gesinterten Kavität steigt bei allen Materialien mit der Foliendicke. Dafür sind zwei Faktoren verantwortlich. Erstens erleichtert der abnehmende Umformwiderstand die Materialumordnung. Zweitens bewirkt die in dickeren Folien geringere Verdichtung eine höhere lokale Schwindung, welche die Kavität beim Sintern weiter vertieft. Bei einer Werkzeuggestiefe von $80\text{ }\mu\text{m}$ stellt sich eine Kavitätstiefe von $35\text{--}45\text{ }\mu\text{m}$ je nach Material und Foliendicke ein. Beim Entwurf muss daher in vertikaler Richtung eine Verringerung der Kavitätstiefe um ca. 50% berücksichtigt werden. Einzelwerte für die verschiedenen Grünfolien sind Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Rückschlüsse auf Verdichtungsgradienten können aus den lokalen Schwindungen gezogen werden. Als Vergleichsgröße dient die Ausbauchung vor dem Sintern Bow_P und nach dem Sintern Bow_K als Maß für die lokale Schwindung in vertikaler Richtung am Rand und in der Mitte der Kavität (s. Bild 4-6). Bei DP951 und BGK bewirkt der Sinterschritt unabhängig von der Foliendicke in etwa eine Verdopplung der Ausbauchung. Bei CT700 erfolgt eine Steigerung um Faktor 4 bei einem vertikalen Prägeverhältnis von 0,26 und sogar um Faktor 8 bei 0,18. Erklärbar ist das Verhalten durch die starken Bindungskräfte des Materials, auf welche die hohen Schergrenzspannungen (siehe Tabelle 2-2 bzw. Abschnitt 2.3) schließen lassen. Sie behindern die Materialum-

ordnung und führen in Verbindung mit der hohen inneren Reibung zu ungleichmäßiger Verdichtung, welche die lokalen Schwindungen in vertikaler Richtung stark variieren lässt.

4.2.4 Feinstrukturen

Geprägte Feinstrukturen dienen als Fluidkanäle oder Leiterbahnen mit hoher Stromtragfähigkeit. Sie sind durch ein horizontales Prägeverhältnis kleiner als 1 gekennzeichnet. Oft werden periodisch wiederkehrende Elemente zur Erzeugung von Mäandern oder Spulen benötigt. An solchen Geometrien ist die Strukturausbildung hauptsächlich durch die Reibung begrenzt, welche das Füllen schmaler Stege limitiert (s. Abschnitt 3.3 und [BAR08b]). Dieser Sachverhalt wird durch das Füllverhältnis in Gleichung 4-28 beschrieben. Den Umformwiderstand an periodisch wiederkehrenden Strukturen beschreibt Gleichung 4-21, er ist abhängig vom vertikalen Prägeverhältnis sowie vom horizontalen Strukturverhältnis.

Zunächst wird der Einfluss des vertikalen Prägeverhältnisses auf die Strukturausbildung anhand visioplastischer Schliffbilder betrachtet. Bild 4-11 zeigt Querschnitte durch ungesinterte Folienanordnungen von 2-4 Lagen DP951 C2. Mit einem 80 μm tiefen Werkzeug sind Strukturen einer Periode von 100 μm bzw. 200 μm ohne Schmierung abgeformt. Die Strukturdichte beträgt 0,5.

Bei der zweilagigen Anordnung verhindert der große Umformwiderstand die vollständige Füllung der Stege. Die 50 μm breiten Stege links werden durch Materialumlagerung aus der obersten Folienlage geformt. An den 100 μm breiten Stegen setzt sich die Druckwirkung in tiefere Schichten fort. Bei einer dreilagigen Anordnung erfasst die Materialverschiebung weitere Bereiche und füllt so die 100- μm -Stege. Erst bei der 4-lagigen Anordnung werden die feinen Stege ausgefüllt.

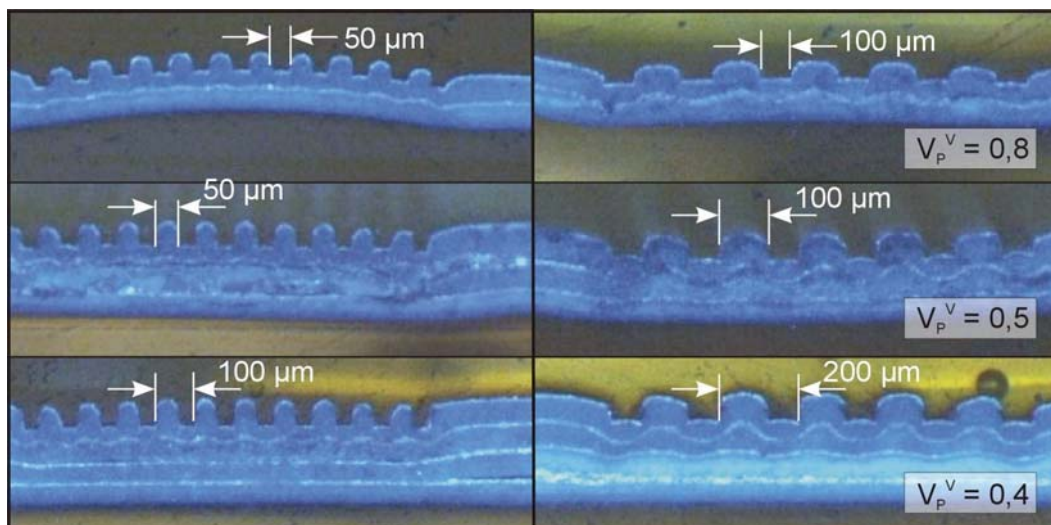


Bild 4-11: Einfluss des Prägeverhältnisses auf die Abformung ohne Öl in DP951 für ein Linien-Steg-Verhältnis $B:W$ von 50:50 μm (links) und 100:100 μm (rechts).

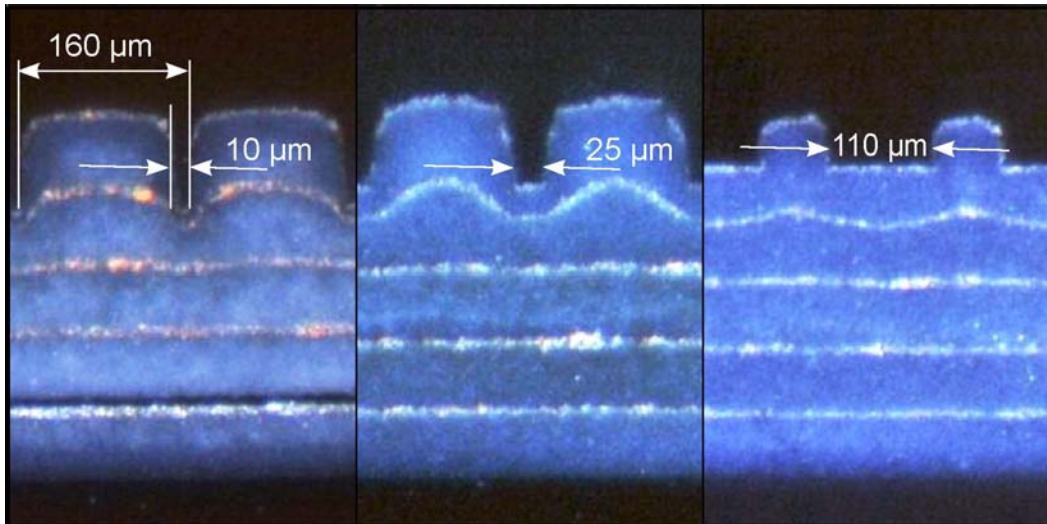


Bild 4-12: Visioplastischer Querschliff durch eine Prägung in DP951 bei konstanter Periode P von $160\mu\text{m}$ und variablen Linien-Steg-Verhältnissen.

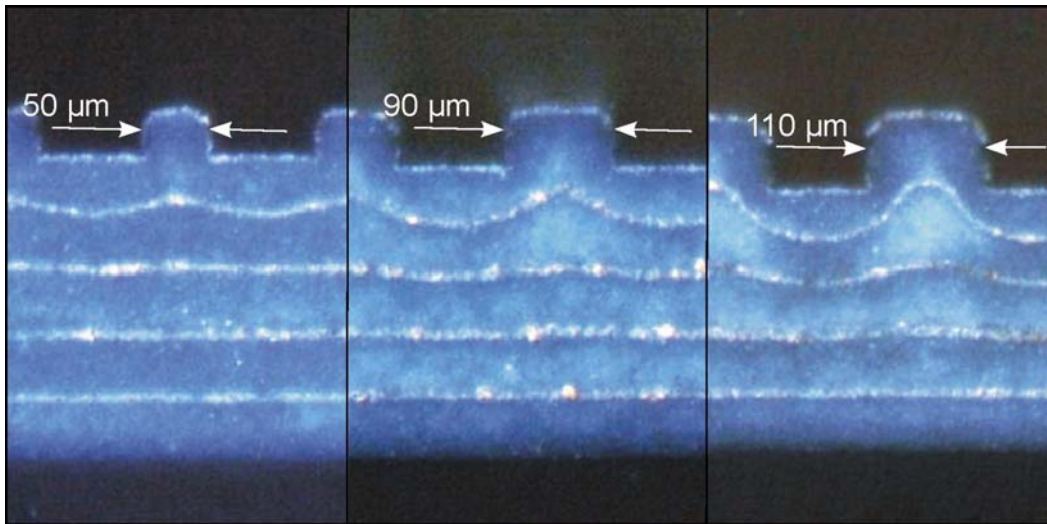


Bild 4-13: Visioplastischer Querschliff durch eine Prägung in DP951 bei konstanter Linienbreite W von $90\mu\text{m}$.

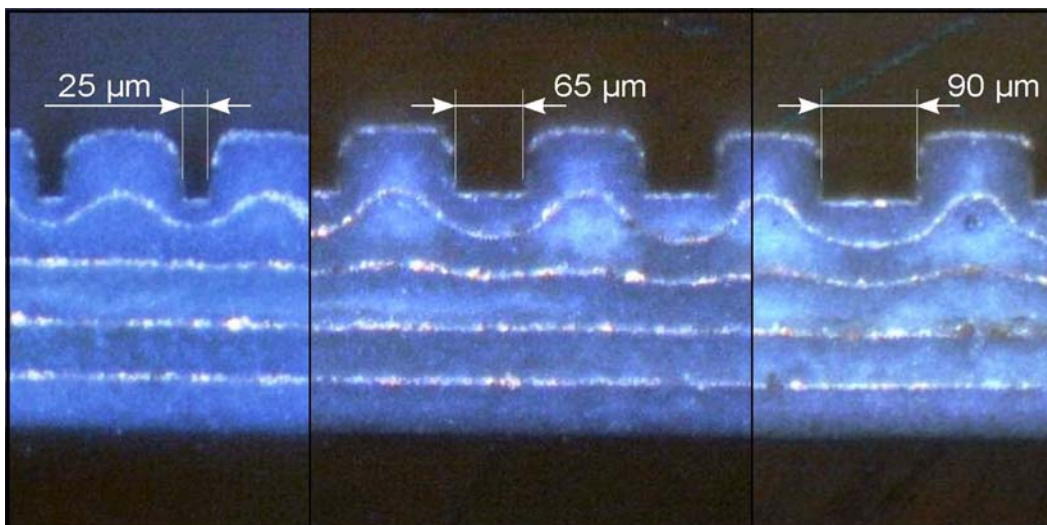


Bild 4-14: Einfluss der Linienbreite bei konstanter Stegbreite B von $110\mu\text{m}$ auf die Abformung in DP951.

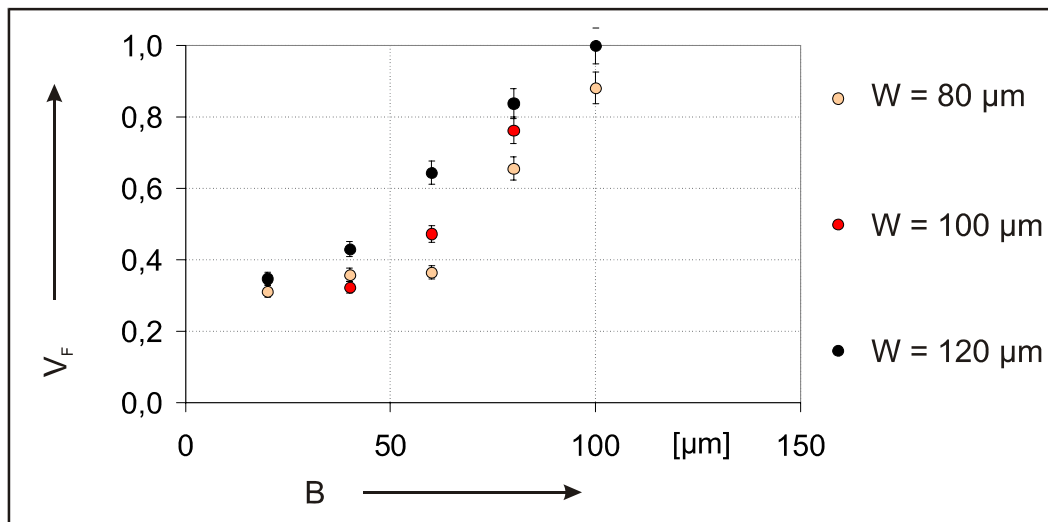


Bild 4-15: Füllverhältnis V_F in Abhängigkeit der Strukturgeometrie für ein vertikales Prägeverhältnis V_P^V von 0,32 in DP951.

Bild 4-12 zeigt Schliffe an Proben mit konstanter Periode und unterschiedlicher Strukturdichte. Bei sehr schmalen Linien (links) wird lediglich die oberste Folienlage eingeschnitten. Bei breiteren Linien wird zunehmend Material aus tieferen Schichten verdrängt. Nach Erreichen des Gleichgewichtes zwischen eingepprägter Spannung, Verformung und Reibung an schmalen Stegen wirkt die gesamte Fläche wie ein großflächiger Strukturbereich mit der Strukturdichte 1.

Den Einfluss der Stegbreite auf den Materialfluss im Folienstapel zeigt Bild 4-13. An schmalen Stegen verhindern Reibung und elastische Verformung die Materialverschiebung in tiefere Folienlagen. Dadurch bleibt das Füllverhältnis begrenzt. An breiteren Stegen verbessert sich das Füllverhältnis, bei einer Stegbreite von 100 μm sind die Zwischenräume ausgefüllt.

Die Linienbreite wurde bei den Schliffbildern in Bild 4-14 variiert. Der damit steigende Umformwiderstand bewirkt, dass Material in tieferen Folienlagen umgeordnet wird. Die Abhängigkeit des Füllverhältnisses von Stegbreite und Linienbreite zeigt Bild 4-15 quantitativ für das Material DP951. Das Füllverhältnis steigt wie erwartet mit zunehmender Stegbreite, breitere Linien bewirken durch Beeinflussung tieferer Materialbereiche eine Verschiebung der Kennlinie zu höheren Füllverhältnissen. Das Füllverhältnis von 1 wird ohne Schmierung für 100 μm breite Stege bei einer Linienbreite W von 120 μm erreicht.

Die quantitative Abhängigkeit des Füllverhältnisses vom vertikalen Prägeverhältnis unter Berücksichtigung der Schmierung für DP951 zeigt Bild 4-16. Ohne Schmierung ergibt sich ein maximales Füllverhältnis von 80% bei vertikalen Prägeverhältnissen von 0,25 bis 0,5 an 50 μm breiten Stegen, die mit einer Periode von 100 μm angeordnet sind. Auch bei 100 μm breiten Stegen mit einer Periode von 200 μm wird das angestrebte Füllverhältnis von 1 ohne Schmierung nicht erreicht. Bei Verwendung von Öl

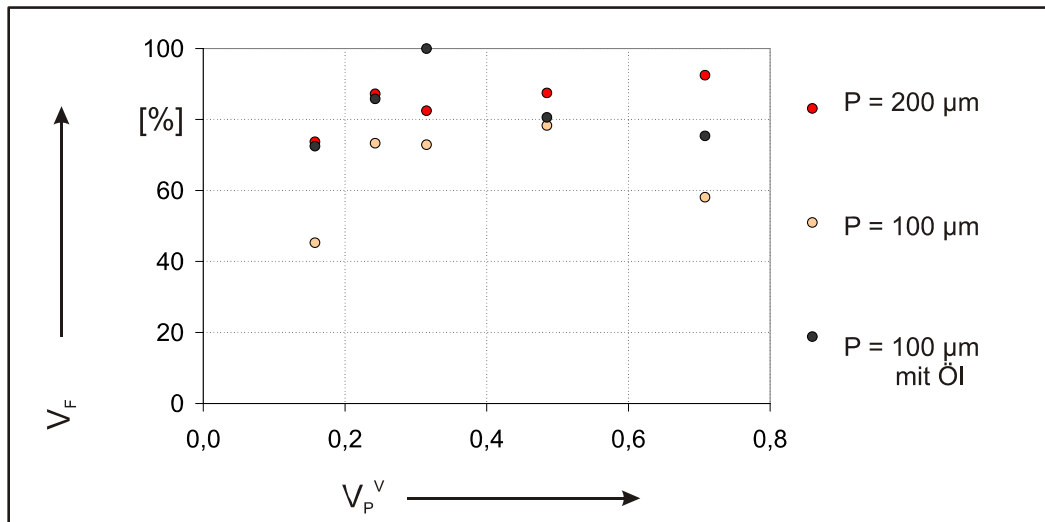


Bild 4-16: Abhängigkeit des Füllverhältnisses V_F vom Prägeverhältnis V_P^V für verschiedene Strukturgrößen und Schmierzustände.

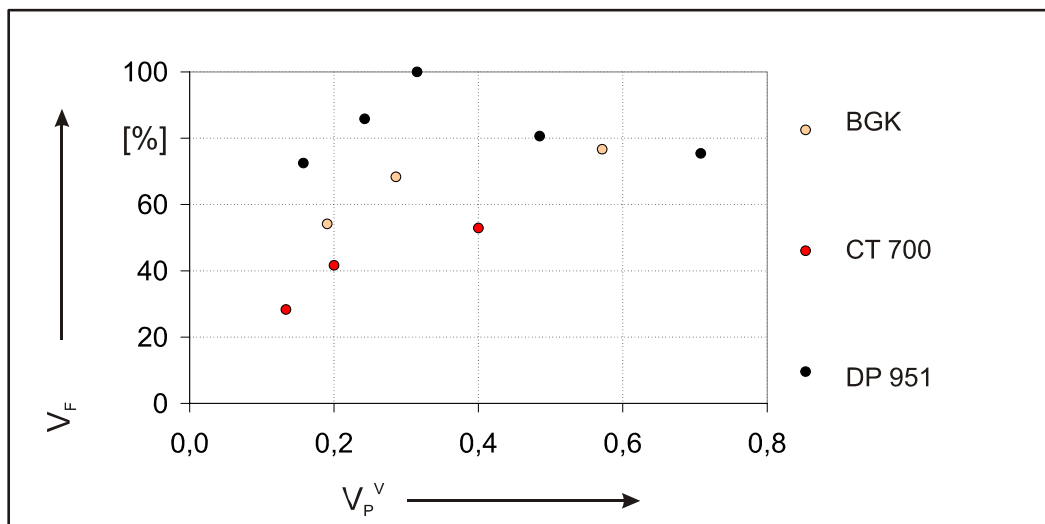


Bild 4-17: Abhängigkeit des Füllverhältnisses V_F vom Prägeverhältnis V_P^V beim Prägen verschiedener Materialien mit einer Temperatur von 57°C und einem Druck von 100 MPa mit Öl-Schmierung.

werden die 50-μm-Linien bei einem Prägeverhältnis von ca. 0,3 vollständig gefüllt. Bei steigendem Prägeverhältnis nimmt das Füllverhältnis aufgrund der zunehmenden Elastizität des Folienstapels wieder ab.

Die Füllung von Feinstrukturen mit 50μm breiten Stegen, die mit einer Periode von 100μm angeordnet sind, ist in Bild 4-17 für verschiedene Grünfolien verglichen. Die Abformung erfolgte mit Schmierung. DP951 zeigt das beste Füllverhältnis im Materialvergleich. Das Material unterscheidet sich durch geringe Bindungskräfte, wie aus den Grenzspannungen bei Scherbelastung folgt (vgl. Tabelle 2-2 in Abschnitt 2.3). Da seine Verdichtbarkeit gering ist (Abschnitt 2.5, Bild 2-33) und die spezifische Staucharbeit groß (Abschnitt 2.4, Bild 2-20), wird das Material hauptsächlich in die Werk-

zeugzwischenräume hineingedrängt anstatt aus dem Strukturbereich zu fließen oder verdichtet zu werden.

Die Formung von Feinstrukturen vor und nach dem Sintern vergleicht Bild 4-18. Durch Verwendung von Öl wird das Werkzeug optimal abgeformt. Im Grünzustand kommt es zu einer Aufweitung des Grünkörpers in der Stegkrone. Dieser Sachverhalt wurde bereits in [BAR07a] quantitativ untersucht. In der Arbeit wurde festgestellt, dass Abweichungen von der Sollgeometrie während des Sinterns kompensiert werden.

Bild 4-19 vergleicht Querschliffe von Werkzeug und abgeformten Grünfolien in einer Fotomontage, ergänzend ist jeweils ein Profilbild der gesinterten Keramik mit Angabe der erreichten Strukturhöhe dargestellt. Die Bilder wurden mit einem Auflichtmikroskop /Axiotech/ bei gleicher Einstellung aufgenommen. Es wird deutlich, dass DP951 bei gleichen Abformbedingungen die schmalen Stege wesentlich besser füllt. Nach

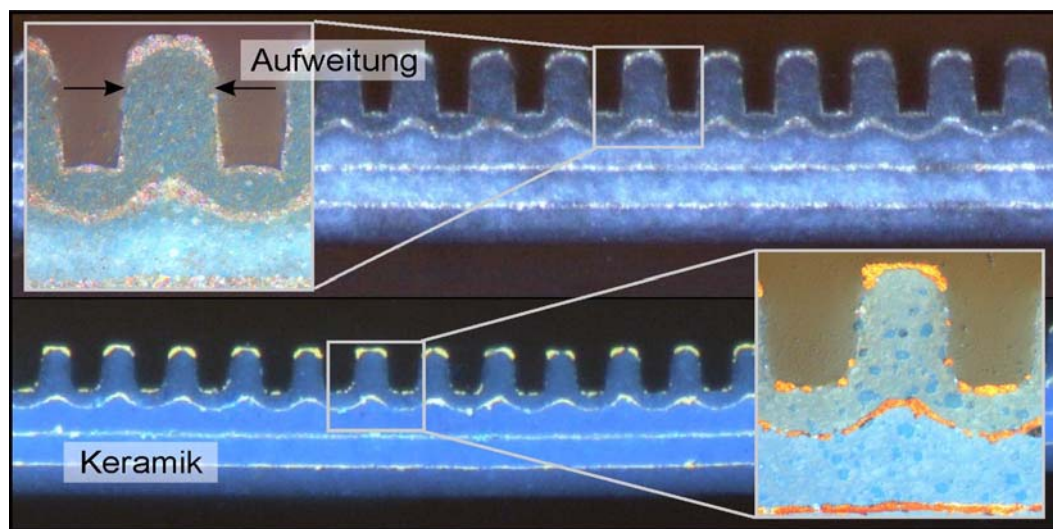


Bild 4-18: Lokale Schwindung an Feinstrukturen, Beispiel mit Öl geprägte 4-Lagenanordnung in DP951.

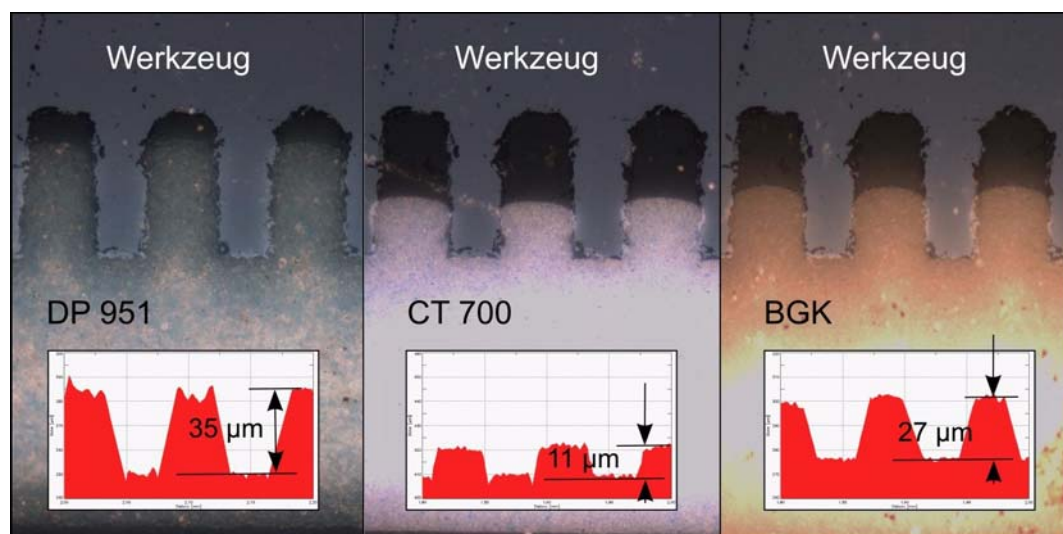


Bild 4-19: Querschnitt von Werkzeug, geprägter Grünfolie und Profil der gebrannten Keramik.

dem Sintern stellt sich bei diesem Material das größte vertikale Entwurfsverhältnis ein. Die resultierende Tiefe der gesinterten Keramikkanäle beträgt $35\text{ }\mu\text{m}$. Das kleinste Entwurfsverhältnis zeigt CT700, die gesinterte Kanaltiefe beträgt hier $11\text{ }\mu\text{m}$.

4.2.5 Horizontale Schwindungsverteilung

Die lokale Schwindung in horizontaler Ebene wird für das Material DP951 untersucht. Strukturen mit einer Prägetiefe von $53\text{ }\mu\text{m}$ werden in $254\text{ }\mu\text{m}$ dicke Einzellagen DP951AT abgeformt und anschließend frei gesintert (s. Abschnitt A 1.4). Die Vermessung erfolgt mit einem Profilometer /Cyberscan/. Die lokalen Schwindungsraten erlauben Rückschlüsse auf die lokale Verdichtung. Der Bezugswert der Schwindung wird in der Mitte des Probeteils an den äußeren Abstandsmarken bestimmt. Mit diesem Wert werden die theoretischen Strukturgrößen bei konstanter Dichteverteilung ermittelt. Die Differenz zwischen den theoretischen und realen Werten ergibt die lokalen Schwindungsabweichungen. Sie sind in Bild 4-20 dargestellt. Um die Kavitäten treten die größten Dichteänderungen auf, gekennzeichnet durch Abweichungen der Schwindung bis zu $0,8\%$ vom Bezugswert. Die Schwindungsabweichung nimmt mit der Größe des durch Prägen verdichteten Bereiches zu. An den äußeren Abstandsmarken, die mindestens 4 mm von den Strukturbereichen entfernt liegen, beträgt die Schwindungsabweichung maximal $0,3\%$. Aus der Verdichtung resultiert eine lokale Dimensionsvergrößerung der gebrannten Proben.

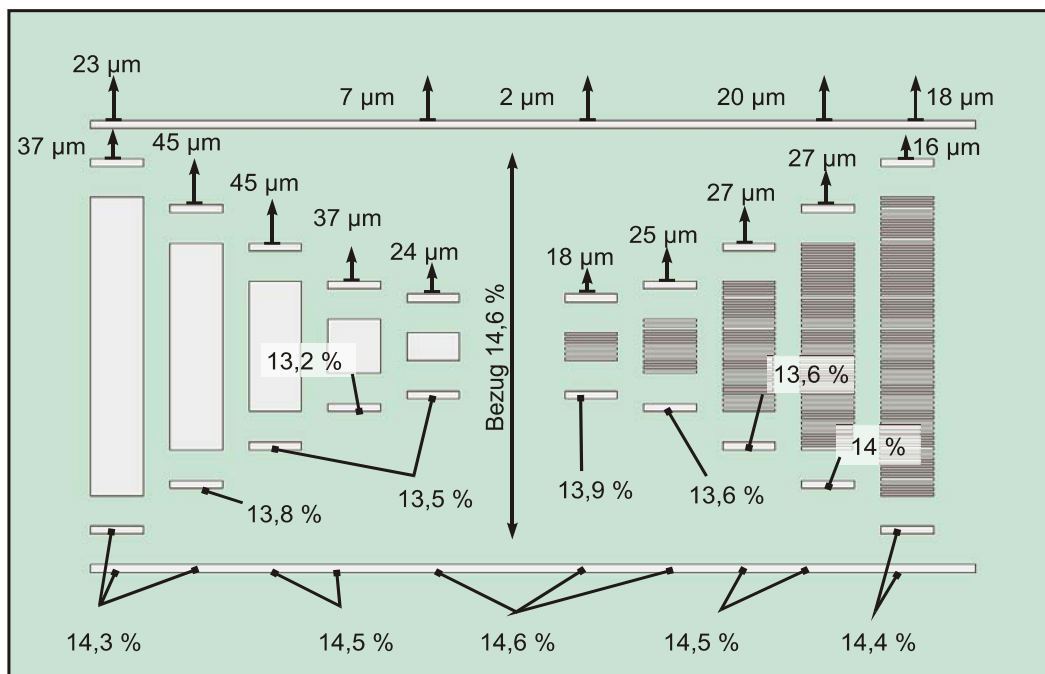


Abbildung 4-20: Lokale Schwindung in horizontaler Ebene.

4.3 Phänomenologische Beschreibung des Prägevorgangs

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Prägevorgang durch das komplexe Zusammenspiel von Materialfestigkeit, Elastizität, Verdichtbarkeit und Reibung charakterisiert wird. Die einzelnen Einflüsse auf das Umformergebnis werden hier zusammenfassend diskutiert. Bild 4-21 veranschaulicht die Vorgänge beim Prägen einer Mikrostruktur schematisch. Bis zum Erreichen der Materialbelastungsgrenze finden elastische Verformungen statt. Da an den Strukturkanten die größten Spannungen auftreten, beginnt hier das Material abzuscheren. Die Scherfestigkeit wird durch die Bindungskräfte zwischen Binder und Feststoff bestimmt, welche für die betrachteten Grünfolien durch die Grenzspannungen in Tabelle 2-2 repräsentiert werden. Die Werkzeugflanke dringt in den Grünkörper ein. Das Abgleiten bewirkt eine elastische Verformung der mit dem Werkzeug in Kontakt stehenden Grenzschicht. Schmierung verringert die Haftreibung und die Dicke der beeinflussten Grenzschicht (s. Abschnitt 3.2.4). Diese Grenzschichtdicke bestimmt im Zusammenspiel mit der Elastizität und Scherbelastbarkeit des Materials das Abformverhalten von Feinstrukturen. An schmalen Stegen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Prägedruck und Reib-

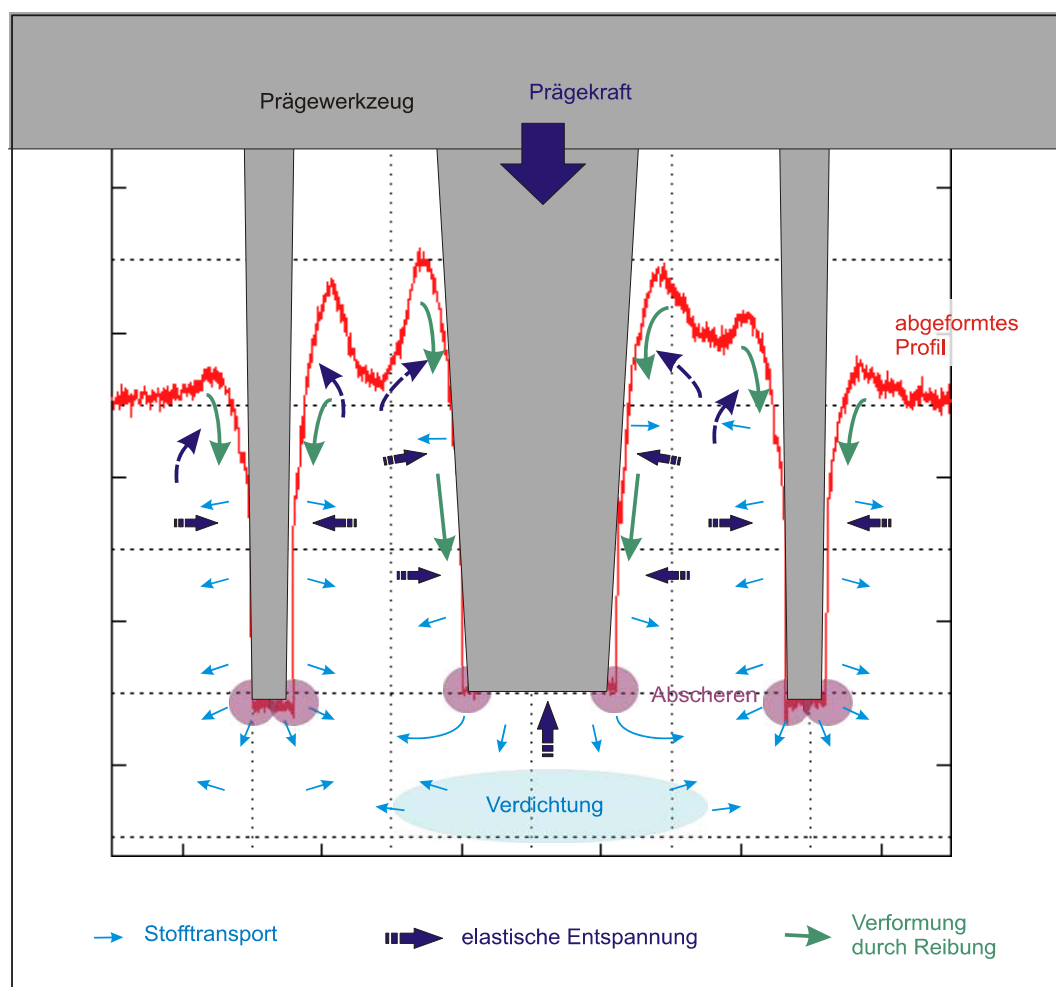


Bild 4-21: Einflüsse auf die Strukturformung beim Prägeprozess.

schubspannung einerseits sowie elastischer Deformation andererseits ein, das an schmalen Stegen die vollständige Formfüllung verhindert. Neben der Grenzschichtdicke beeinflusst der Umformwiderstand die minimal abformbare Steggeometrie einer Prägeanordnung. Schmierung, Werkstoffpaarung und Ausformwinkel haben daher einen großen Einfluss auf die Abformung. Feinstrukturen werden unter den verglichenen Materialien in der DP951-Keramik mit der größten Tiefe abgebildet. Die Grünfolie hat im Vergleich die geringste Scherfestigkeit. Die Kombination dieser Eigenschaft mit der hohen Steifigkeit und geringen Verdichtbarkeit bewirkt, dass Material vorzugsweise in die Werkzeugzwischenräume gedrängt wird und nicht aus dem Strukturbereich fließt.

Bei Strukturen mit großem Umformwiderstand wie Kavitäten ist die Grenzschicht klein im Vergleich zur horizontalen Ausdehnung des Prägewerkzeuges. Die Spannung nimmt zur Werkzeugmitte hin ab (vgl. Bild 4-1), es kommt hauptsächlich in der näheren Umgebung der Werkzeugkante zu Materialumordnungen. Unterhalb der Strukturen findet aufgrund des hohen Umformwiderstandes vermehrt Verdichtung statt. Bedingt durch diese Verdichtung erhöht sich zusätzlich die Fließspannung (s. Bild 2-14). In der Kavitätsmitte treten daher elastische Verformungen auf, die nach Entlastung den Boden ausbauchen. Der durch den Abformvorgang induzierte Dichtegradient führt zu einer Verstärkung dieser Ausbauchung beim Sintern.

Im Versuch eignet sich BGK zur Abformung von Kavitäten am besten. Die erreichte Kavitätstiefe nach dem Sintern ist in dieser Keramik am größten. Verantwortlich hierfür sind die geringe spezifische Staucharbeit und die hohe Verdichtbarkeit der Folie.

CT700 zeigt aufgrund seiner hohen Scherbelastungsgrenzen und Verdichtbarkeit den stärksten Dichtegradient der betrachteten Grünfolien. Der Umordnung des Materials in die angrenzenden Bereiche der Prägestruktur wirken die starken Bindungskräfte entgegen. Die Ausbauchung der Versuchsgeometrie beträgt im gebrannten Zustand unter ungünstigen Bedingungen bis zu $15\mu\text{m}$. Sie kann durch Senkung des Umformwiderstandes bei Verwendung eines dickeren Ausgangsmaterials verringert werden.

Aus den Beobachtungen lassen sich Anforderungen an die Prägebedingungen ableiten. Die Prozessführung zur Abformung von Feinstrukturen muss die Verringerung der Reibung sowie der Scherbelastbarkeit des Komposites zum Ziel haben. Eine geringe Kompressibilität und hohe Steifigkeit der Grünfolie wirkt sich günstig aus. Die Verwendung dicker Folienanordnungen ist durch die damit verbundene Elastizitätserhöhung unvorteilhaft.

Bei Abformung von Kavitäten wirkt sich die Verwendung dickerer Folienanordnungen günstig aus. Der dadurch verminderte Umformwiderstand führt zu besseren Abformergebnissen. Durch Senkung der spezifischen Staucharbeit, z.B. durch eine höhere Prozesstemperatur, sind weitere Verbesserungen möglich.

5 ANWENDUNGSBEISPIELE

5.1 LTCC-Induktivitäten mit geprägten Leiterbahnen

5.1.1 Einordnung der Arbeiten

Obwohl sich LTCC-Bauelemente durch exzellente thermische, dielektrische und Hochfrequenzeigenschaften auszeichnen, ist ihr Anwendungsbereich durch die auf ca. $15\mu\text{m}$ begrenzte Schichtdicke von Siebdruckleiterbahnen eingeschränkt. Konzepte zur Überwindung dieser Einschränkung wurden bereits in vorausgehenden Arbeiten realisiert [ALB03, HIN05]. Ein Erfolg versprechendes Verfahren ist der kombinierte FODEL[®]-Prozess (s. Abschnitt 3.5). Anfangs wurden unter Nutzung der Technologie Leiterbahnen mit $400\mu\text{m}$ Breite und $50\mu\text{m}$ Höhe durch Prägen in LTCC-Folien realisiert. Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Erweiterung des Prozesses auf Feinleiterstrukturen und auf das justierte Prägen von vorprozessierten Folien mit strukturierten Vias, um die Voraussetzung zum Aufbau mehrlagiger Bauelemente hoher Integrationsdichte zu schaffen. Als Ergebnis der Weiterentwicklung sind $50\mu\text{m}$ feine Leiterbahnen mit einer maximalen Prägetiefe von $80\mu\text{m}$ realisiert, die zu 4-lagigen Bauelementen aufgebaut sind. Das Füllen der Feinstrukturen sowie die thermische und hochfrequenztechnische Charakterisierung erfolgten in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe FUNKTIONALISIERTE PERIPHERIK und waren nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die wesentlichen Ergebnisse der in Kooperation entstandenen Veröffentlichung [PER09] sind im folgenden Abschnitt unter dem Anwendungsaspekt zusammengefasst. Die Vorteile der Technologie kommen bei Sensorspulen zur Abstandsmessung zum Tragen. Die Ergebnisse der im Rahmen der Arbeit betreuten Projektarbeit zu diesem Thema sind in [GEI08] veröffentlicht und in Abschnitt 5.1.3 zusammengefasst.

5.1.2 Thermische Eigenschaften und HF-Eigenschaften

Das kombinierte FODEL[®]-Verfahren zeichnet sich durch eine exakte Leiterbahndefinition bei hohen Leiterquerschnitten aus. Der Technologieablauf ist in Abschnitt 3.5 beschrieben. In Bild 5-1 sind ein konventioneller FODEL[®]-Feinleiter und ein geprägter, mit FODEL[®]-Paste gefüllter Feinleiter im gebrannten Zustand gegenübergestellt. Die Leiterbahndicke erhöht sich von $7\mu\text{m}$ auf $35\mu\text{m}$. Bei gleicher Integrationsdichte sinken dadurch Flächenwiderstand und Verluste um Faktor 8 im Vergleich zum konventionellen FODEL[®]-Verfahren. Daraus ergeben sich eine Reihe von Vorteilen bei Verwendung von LTCC-Induktivitäten als SMD-Bauelement (SMD=Surface Mounted Device) und als integrierte Spulen.

Geprägte, auf einem LTCC-Substrat integrierte Spulen, geprägte LTCC-SMD-Spulen und kommerziell erhältliche, auf einen Keramikkern gewickelte Spulen gleicher

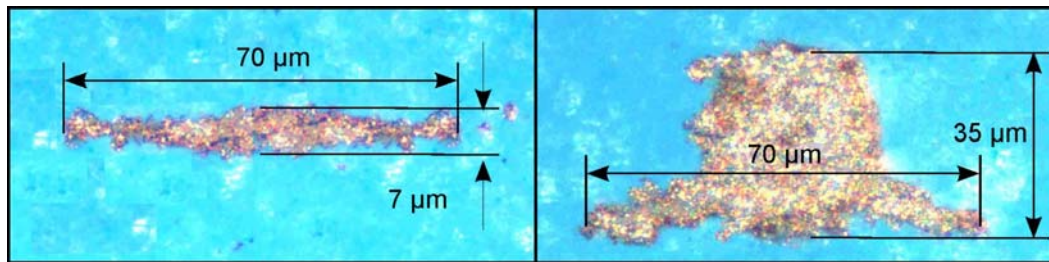


Bild 5-1: Querschnittsvergleich von Leiterbahnen der DP6453-Paste. Links: im FODEL®-Verfahren belichtete Siebdruckschicht, rechts kombiniertes FODEL®-Verfahren mit geprägter Leiterbahn.

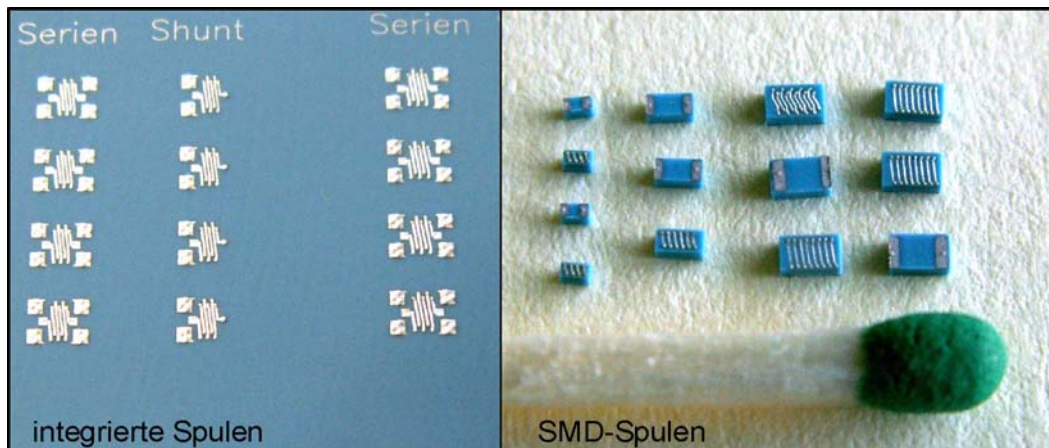


Bild 5-2: Integrierte Spulen und SMD-Bauelemente, hergestellt mit dem kombinierten FODEL®-Verfahren.

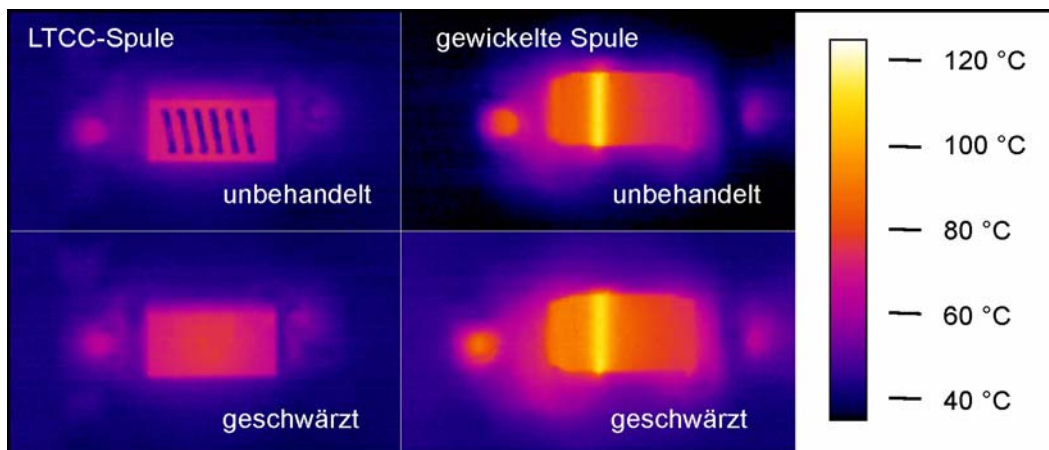


Bild 5-3: Thermogramm der Bauelementeoberfläche von LTCC-Spulen und gewickelten Spulen, SMD-Baugröße 0603 betrieben bei 1,2A.

Induktivität werden verglichen. Die LTCC-Bauelemente sind in Bild 5-2 dargestellt. Der Leiterbahnquerschnitt der geprägten Variante beträgt $35\mu\text{m} \cdot 50\mu\text{m}$.

Die Stromtragfähigkeit der LTCC-SMD-Spulen und der gewickelten SMD-Spulen wird bei Gleichstromeinspeisung unter thermisch gleichen Bedingungen mit einer Infrarotkamera /Flir/ charakterisiert. Einige Bauelemente werden unbehandelt untersucht, weitere für die Messung geschwärzt, um Oberflächenreflexionen und thermische Emissionen zu unterdrücken. Bild 5-3 zeigt die Thermogramme. Bei den unbehandel-

ten LTCC-Spulen zeichnen sich deutlich die metallischen Leiterbahnen an der Oberfläche ab. Die geschwärzten Spulen werden mit Strömen von 0 A bis 3 A belastet und die sich einstellende maximale Oberflächentemperatur protokolliert. Aus diesen Strombelastungskurven werden anschließend zur Beurteilung der Stromtragfähigkeit der bei einer zulässigen Oberflächentemperatur von 130°C anliegende Nennstrom und der thermische Widerstand R_{Th} für eine Übertemperatur ΔT von 15 K ermittelt:

$$R_{Th} = \frac{\Delta T [K]}{I_{\Delta T = 15K}^2 [A] \cdot R [\Omega]} \quad (GL\ 5-1)$$

$I_{\Delta T = 15K}$ ist der Strom, der eine Temperaturerhöhung von 15 K gegenüber Raumtemperatur hervorruft und R der ohmsche Widerstand des Bauelementes. Besonders bei kleinen Bauelementen zeigen die LTCC-SMD-Spulen eine bessere Stromtragfähigkeit. Für SMD-Bauelemente der Baugröße 0402 mit einer Induktivität von 2,8 nH steigt der Nennstrom für eine Maximaltemperatur von 130°C durch den besseren Wärmeübergang zwischen Leiterstruktur und Keramik von 1,22 A für die gewickelte Spule auf 2,35 A für die geprägte LTCC-SMD-Spule an. Der thermische Widerstand verringert sich von 372 W/K (gewickelt) auf 321 W/K (LTCC geprägt). Die damit verbundene gleichmäßigere Wärmeverteilung in LTCC-SMD-Spulen ist deutlich in Bild 5-3 sichtbar. Sie führt zu einer Steigerung der Belastbarkeit. Die Untersuchung der Hochfrequenzeigenschaften zeigt, dass die Eigenschaften der geprägten SMD-LTCC-Bauelemente mit denen gewickelter Spulen vergleichbar sind. Im Vergleich zu baugleichen LTCC-Spulen ohne geprägte Leiterbahnen erhöht sich die Güte bei einer Frequenz von 1 GHz um 45 %. In Verbindung mit den guten thermischen Eigenschaften ergeben sich daher Einsatzmöglichkeiten in Hochfrequenz-Leistungsverstärkern und Multi-Chip-Modulen mit integrierten Induktivitäten hoher Güte.

5.1.3 Streufeldsensor

Bei Nutzung des Wirbelstromprinzips zur Abstandsmessung werden Spulen hoher Güte benötigt. Als berührungslose, schmutzunempfindliche Positions-, Verschiebungs- und Abstandssensoren finden Wirbelstromsensoren breite Anwendung in der Längenmess- und Automatisierungstechnik. LTCC-basierte Messspulen arbeiten unter extremen Bedingungen, zum Beispiel als Vibrationssensoren zur Kontrolle von Unwuchten in Turbinen und Triebwerken [LAI05]. Das Messprinzip beruht auf der Auswertung der Impedanzänderung einer Sensorspule, in deren Streufeld sich ein metallischer Körper (Target) befindet. In diesem Körper werden Wirbelströme induziert, die ein magnetisches Gegenfeld und Wärmeverluste bewirken. Bild 5-4 zeigt ein schematisches Funktionsprinzip. Die Messspule kann im Ersatzschaltbild als abstandsabhängige Impedanz mit dem induktiven Anteil $L(x)$ und dem Verlustanteil $R(x)$ dargestellt werden. Die Sensoreffizienz steigt mit der Leerlaufgüte Q der Messspule, welche der Spu-

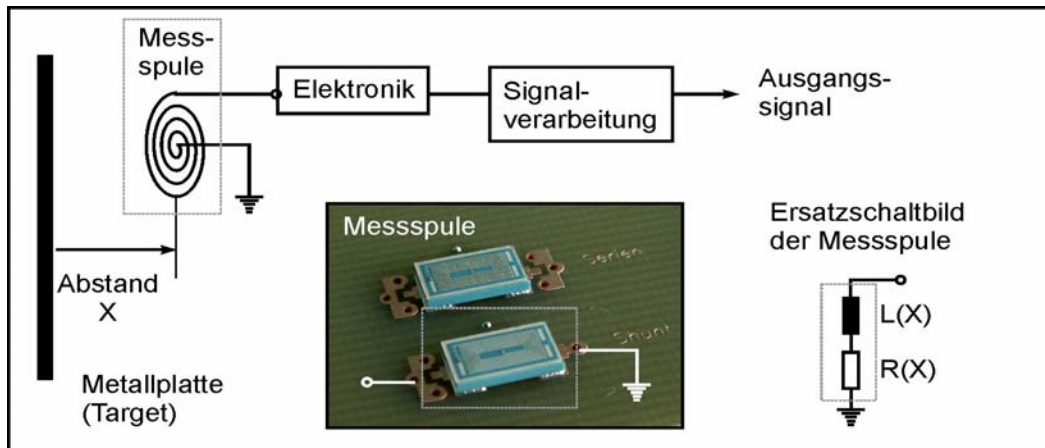


Bild 5-4: Abstandsmessung nach dem Wirbelstromprinzip.

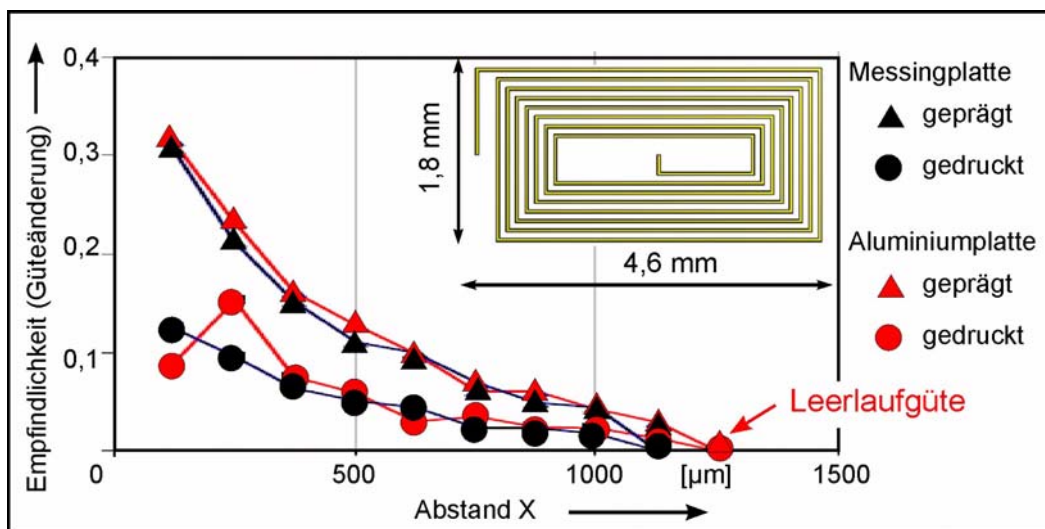


Bild 5-5: Abstandsscharakteristik geprägter und gedruckter induktiver Streufeldsensors.

leerlaufgüte bei unendlich weit entferntem Target entspricht. In Abhängigkeit vom Abstand x des Targets ändert sich die Güte der Messspule, die wie folgt berechnet wird:

$$Q(X) = \frac{\omega \cdot L(X)}{R(X)} \quad (\text{GL 5-2})$$

Die Arbeitsfrequenz ω ist unterhalb der Eigenfrequenz zu wählen. Mit abnehmenden Wärmeverlusten erhöhen sich Genauigkeit und Störfestigkeit [ROA98].

Im Versuch werden 4-lagige Spulen mit 32 Windungen verglichen. Sie werden bei gleichem Design mit dem FODEL[®]-Verfahren bzw. mit dem kombinierten FODEL[®]-Verfahren (s. Bild 3-17) hergestellt. Während die Leerlaufinduktivität bei beiden Varianten $2,6 \mu\text{H}$ beträgt, reduziert sich der Spulenwiderstand von $14,7 \Omega$ (gedruckt) auf $6,7 \Omega$ (geprägt). Unabhängig vom Herstellungsverfahren haben die Sensorspulen eine Eigenresonanzfrequenz von 80 MHz.

Zur Bestimmung der Abstandsscharakteristik werden Metallplatten aus Aluminium und Messing in definiertem Abstand angeordnet und die Induktivitäten sowie die Wider-

stände bei einer Arbeitsfrequenz von 200 kHz mit einem LCR-Meter /HP4284A/ bestimmt. Aus den Messwerten wird die Güte nach Gleichung 5-2 berechnet. Die Empfindlichkeit der Messanordnung ergibt sich aus der Differenz zwischen abstandsabhängiger Güte und Leerlaufgüte. Sie ist in Bild 5-5 in Abhängigkeit vom jeweiligen Targetabstand dargestellt. Die Reichweite der Senserspulen beträgt ca. 500 μm . Die Empfindlichkeit geprägter Senserspulen steigt im Vergleich zu der ungeprägten Spulen auf den doppelten Wert.

5.2 Anwendungen in Fluidsystemen

5.2.1 Ventilstrukturen in LTCC-Fluidsystemen

In Mikroreaktoren ist die gezielte Einstellung der Durchflussmenge im Fluidsystem eine wesentliche Voraussetzung zur Reaktionskontrolle. Dazu finden Regelventile Verwendung, die Fluidströme kontinuierlich durch stetige Veränderung des Öffnungsquerschnitts beeinflussen. Sie stellen steuerbare Strömungswiderstände dar. Das monolithische Einbringen von Ventilen als Stellglied in LTCC-Fluidsysteme ermöglicht die Stoffflussregelung und Reaktionsführung in einem Baustein. Membranventile sind in LTCC-Technologie herzustellen, indem eine Keramikmembran, die durch eine Dichtkraft F_D ausgelenkt wird, eine Auslassöffnung im Dichtsitz schließt. Bild 5-6 zeigt eine solche Anordnung schematisch. Ihr Dichtverhalten wird hier näher untersucht. Die Charakterisierung von Siebdruckschichten und ihrer Dichteigenschaften war Gegenstand einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Projektarbeit.

Die Verbesserung der Dichtwirkung eines Ringsitzes wird durch die Erhöhung der Oberflächenqualität, das Einfügen duktiler Materialien und die Verringerung der

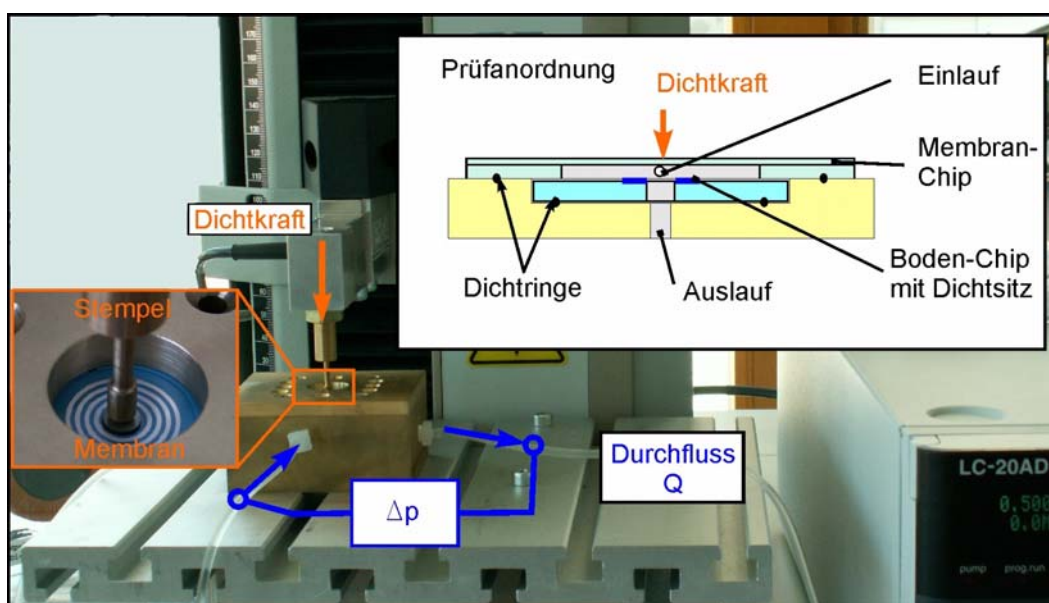


Bild 5-6: Anordnung zur Messung des Leckagewiderstandes.

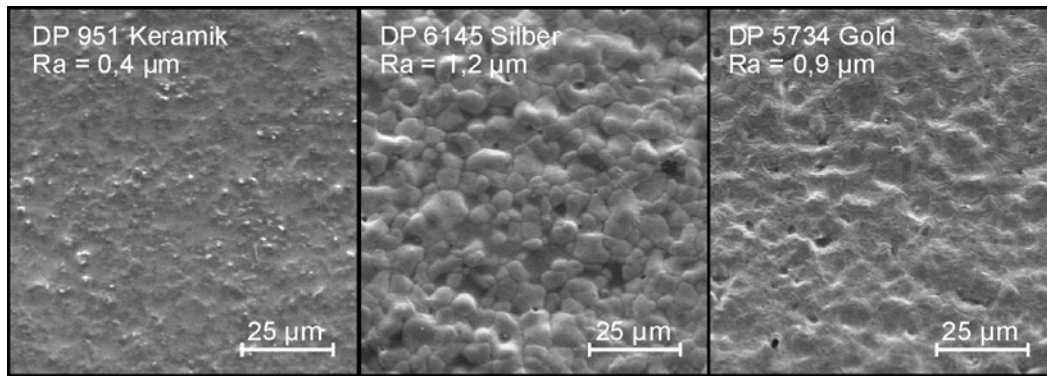


Bild 5-7: Oberflächen von DP951-Keramik und kompatiblen Dickschichtpasten.

Dichtfläche erreicht. Duktile Materialien wie Silber oder Gold werden als temperaturfeste Beschichtungen von Dichtelementen eingesetzt [GFD09]. Prozesskompatible Dickschichtpasten stehen aus beiden Materialien zur Verfügung: Die Silberpaste DP6145 und die Goldpaste DP5734 eignen sich zur Anwendung auf Innenlagen im DP951-Materialsystem. Mit dem Auftragen im Siebdruck ist eine Vergrößerung der mittleren Rauheit R_a der Pastenoberfläche im Vergleich zur Keramikoberfläche verbunden, wie Bild 5-7 verdeutlicht. Sie wirkt sich nachteilig auf die Dichteigenschaften aus. Die mittlere Rauheit R_a beträgt für die gesinterte DP951-Keramik $0,4\text{ }\mu\text{m}$, für eine gesinterte Golddickschicht (DP5734) $0,9\text{ }\mu\text{m}$ und für eine gesinterte Silberdickschicht (DP6145) $1,2\text{ }\mu\text{m}$. Durch Prägen kann die mittlere Rauheit R_a im gesinterten Zustand für beide Pasten auf $0,4\text{ }\mu\text{m}$ gesenkt werden und entspricht so der Oberflächenqualität der DP951-Keramik [BAR08e]. Neben der Oberflächenglättung können geprägte konzentrische Kreise als Dichtsitzgeometrie erzeugt werden, die durch eine Erhöhung der Flächenpressung die Dichtwirkung weiter verbessern. Im Versuch werden daher vier Dichtsitzvarianten verglichen: die unbehandelte Keramikoberfläche von DP951, ein gedruckter Silberdichtsitz (Silberpaste DP6145), ein gedruckter Golddichtsitz (Goldpaste DP5734) und ein in die Goldpaste geprägter Dichtsitz.

Zur Untersuchung der Dichteigenschaften werden die Membran mit der Ventilkammer und der Dichtsitz durch zwei separate Keramik-Chips nachgebildet, welche in einer Vorrichtung eingespannt sind. Dadurch können verschiedene Dichtsitzpaarungen mit wenig technologischem Aufwand untersucht werden. Bild 5-6 zeigt die Messanordnung. Ventilkennlinien stellen den Strömungswiderstand in Abhängigkeit der Dichtkraft dar. Die Kraft wird in der realisierten Anwendung mit einer Materialprüfmaschine /ZwickM/ aufgebracht. Dadurch kann die Aufsetzkraft am Berührungspunkt von Membran und Dichtsitz anhand des Kraft-Weg-Verlaufs bestimmt werden. Die auf die Membran wirkende Differenz zwischen der Aufsetzkraft und dem Momentanwert der Kraft ergibt die Dichtkraft F_D , welche als Parameter aufgezeichnet wird. Wasser wird als Messmedium mit einer Dosierpumpe /HPLC/ bei einer Flussrate Q_V von $0,05\text{ ml/min}$ in die Vorrichtung eingespeist und der Druckabfall

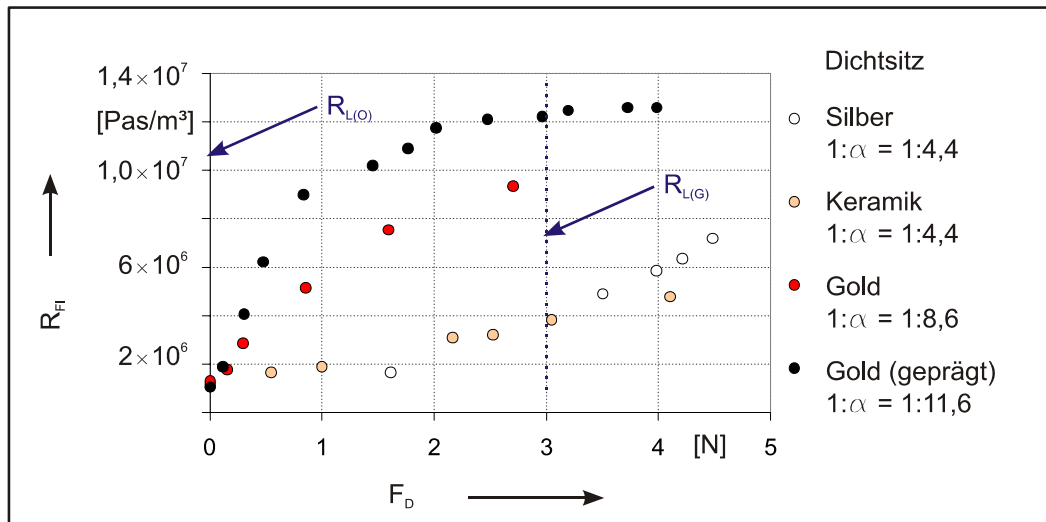


Bild 5-8: Leckagewiderstand R_{Fl} in Abhängigkeit der Dichtkraft F_D für verschiedene Flächenpaarungen.

Δp über der Anordnung mit einem Digitalmanometer /8215/ gemessen. Der Strömungswiderstand R_{Fl} wird bei der jeweiligen Dichtkraft aus dem Verhältnis von Druckabfall Δp zum Durchfluss Q_V berechnet [BÜR09]:

$$R_{Fl} = \left. \frac{\Delta p}{Q_V} \right|_{F_D} \quad (\text{GL 5-3})$$

Bild 5-8 zeigt die gemessenen Ventilkennlinien für verschiedene Flächenpaarungen. Eine charakteristische Ventilkenngröße ist das Stellverhältnis $1:\alpha$. Es beschreibt das Verhältnis zwischen den Leckwiderständen im geschlossenen Ventilzustand $R_{L(G)}$ und offenen Ventilzustand $R_{L(O)}$. Es wird aus der Ventilkennlinie ermittelt:

$$1 : \alpha = R_{L(G)} : R_{L(O)} \quad (\text{GL 5-4})$$

Die gemessenen Ventilkennlinien der verschiedenen Flächenpaarungen sind in Bild 5-8 dargestellt. Der Silberdichtring führt durch die Rauheit der gedruckten Oberfläche nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Dichtcharakteristik. Deutlich ist die Verbesserung der Dichtcharakteristik durch die gedruckten Goldstrukturen erkennbar. Das Stellverhältnis wird bei einer Dichtkraft von 3 N ermittelt. Es steigt von 1:4,4 für die Flächenpaarung Keramik-Keramik auf 1:8,6 für Keramik-Gold. Typische Werte betragen für Mikroventile 1:10 [VET02]. Die Flächenpaarung Keramik-Gold mit geprägtem Dichtsitz erreicht diese Größenordnung mit einem Stellverhältnis von 1:11,6. Durch den Einsatz der Prägetechnologie wird damit die technische Realisierung von Mikroventilen monolithisch in LTCC-Fluidikbaugruppen ermöglicht.

Zur Einbindung der Membranventile in Fluidsysteme ist der Nachweis zu erbringen, dass eine Ventilkammer mit geprägten Dichtgeometrien im Cofire-Prozess herstellbar ist. Die durch Prägen erzeugte Dichtgeometrie muß dabei während der Lamination

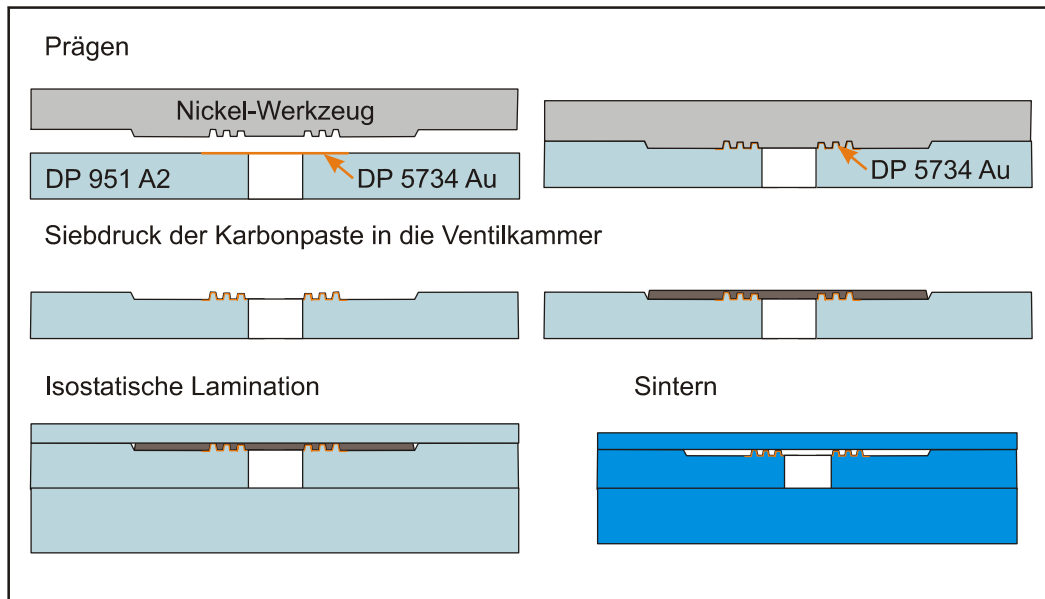


Bild 5-9: Prozess zur Fertigung einer Ventilkammer mit geprägten Dichtstrukturen.

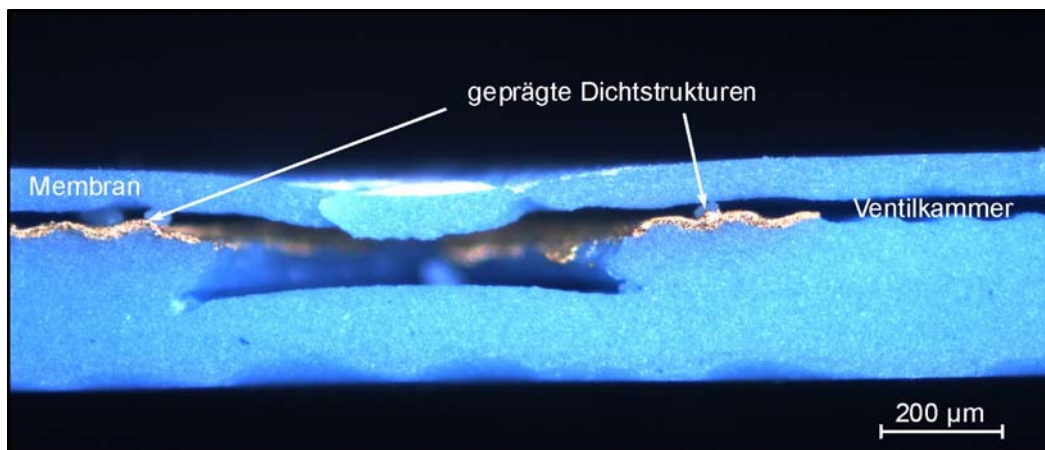


Bild 5-10: Ventilkammer mit geprägter Gold-Dichtstruktur, gesintert mit Karbonpastenfüllung der Kammer unter Standardbedingungen.

geschützt werden. Die Herstellbarkeit fluidischer Kammern durch den Einsatz von Karbonpasten ist in [HIN07] beschrieben. Diese Technologie wird hier erweitert. Die Karbonpaste PST-CARB-SP [TFT07] wird in die geprägte Ventilkammer mit ausgeformter Dichtsitzgeometrie gedruckt. Bild 5-9 zeigt den Fertigungsprozessablauf. Die Lamination mit der Membranlage erfolgt isostatisch bei 70°C und einem Druck von 20 MPa. Zur Sinterung wird ein Standardprofil eingesetzt (s. Abschnitt A 1.1). Zur Begutachtung werden die Kammern mit einer Wafersäge getrennt. Bild 5-10 zeigt eine aufgesägte Kammer nach dem Sintern. Der Durchmesser der hergestellten Ventilmembran beträgt 10 mm bei einer Kammerhöhe von ca. 50 µm. Die Dichtsitzgeometrie bleibt bei der Prozessierung erhalten. Damit ist nachgewiesen, dass Membranventile mit geprägten Dichtstrukturen monolithisch durch Standard-LTCC-Verfahren herstellbar sind.

5.2.2 Integrierter Durchflusssensor für biologische Substanzen

Mikroreaktoren mit integrierten Elektroden sind unter Nutzung der LTCC-Technologie herstellbar [THE07, GRO08]. Soll eine Prozessregelung erfolgen, müssen Sensorelemente zur Durchflusskontrolle im Fluidkanal angeordnet werden. Ein verbreitetes Messprinzip ist die thermische Durchflussmessung, welche auf der Widerstandsänderung, hervorgerufen durch die konvektionsbedingte Temperaturänderung in einem strömenden Fluid, beruht. Neben den funktionalen Forderungen wie geringe thermische Masse und ausreichende Empfindlichkeit, müssen bei biologischen Anwendungen Randbedingungen wie limitierte Übertemperatur und Biokompatibilität der mit dem Fluid in Kontakt stehenden Materialien gewährleistet sein. Ein Durchflusssensor zum Einsatz in Fluidsystemen für PCR-Reagenzien (PCR = POLYMERASE CHAIN REACTION) und Zellflüssigkeiten wurde in einer im Rahmen dieser Arbeit betreuten Projektarbeit entwickelt.

Temperaturempfindliche Dickschichtwiderstände stehen für Postfire-Anwendungen in großer Auswahl zur Verfügung [DUP95]. Die Kompatibilität der Funktionspasten zu den geforderten biologischen Prozessen ist jedoch nicht gegeben [BAR07b], die Sensorelemente müssen daher in die biokompatible Basiskeramik DP951 eingekapselt werden. Da die Sensorpasten zum Einsatz auf Außenlagen bestimmt sind, müssen beim Sintern entstehende Prozessgase definiert abgeführt werden. Andernfalls treten Delaminationen auf, wie Bild 5-11 links zeigt. Geprägte Abluftkanäle, die an den Metallisierungen geführt werden und keinen zusätzlichen Bauraum benötigen, ermöglichen die Gasabfuhr. Bild 5-11 rechts zeigt eine gekapselte Heizerstruktur. Die Technologie zur Herstellung der Fluidkanäle ist in Abschnitt 3.6 beschrieben. Sie ermöglicht die Integration gasbildender Funktionspasten in Innenlagen.

Bild 5-12 stellt die Sensoranordnung dar. Temperatursensor- und Heizerelemente befinden sich auf einer Sensorbrücke im Fluidkanal. Durch die Abdeckung der Funktionselemente mit einer Lage DP951C2 kommt das Medium nur mit prozesskompatiblen Materialien in Kontakt. In die thermisch entkoppelte Sensorbrücke sind Abluftkanäle geprägt, die eine Verdichtung der entsprechenden Keramiklage bewirken. Die Spannungskontrolle zur Herstellung solcher freitragenden Strukturen ist in

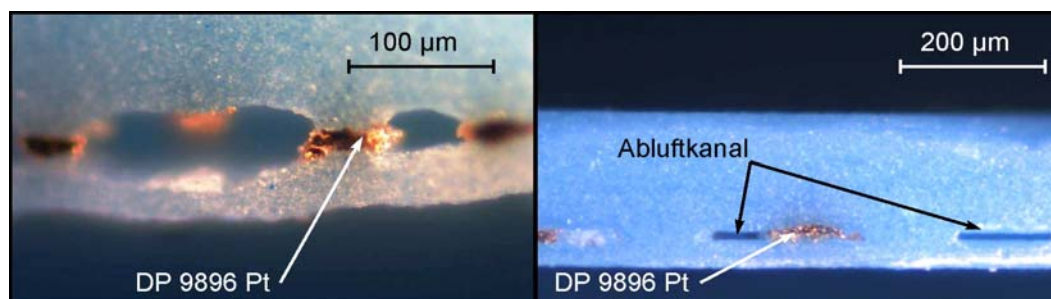


Bild 5-11: Delamination an einer Platinelektrode(links) und Platinelektrode mit Abluftkanal (rechts), angeordnet auf einer Innenlage.

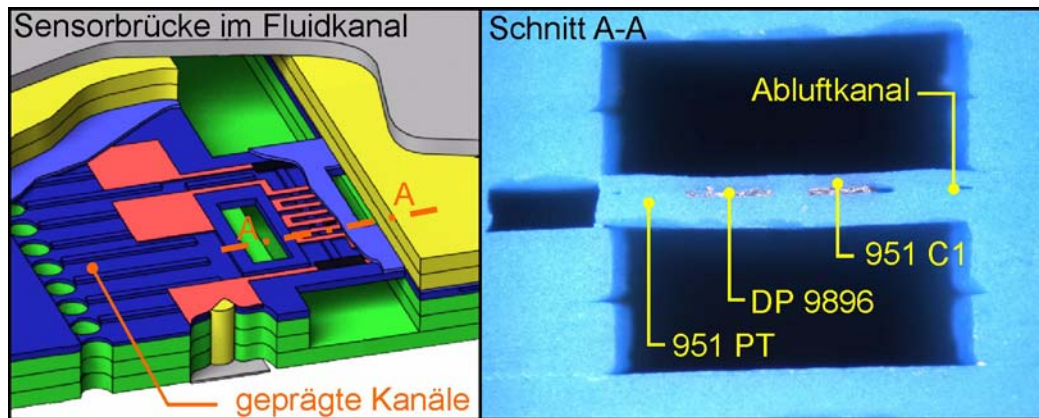


Bild 5-12: Anordnung der Kanäle und Querschnitt durch eine gesinterte Sensorbrücke.

Abschnitt 3.7 beschrieben. Der Deformation der Brückenstruktur aufgrund der Verdichtung wirkt die durch die Metallisierung hervorgerufene entgegen (s. Bild 3-20). Der Prägeschritt erfolgt bei einem Druck von 100 MPa. Etwa die Hälfte der Brückenfläche wird eingepreßt, so dass die mittlere Verdichtung überschlägig der bei einem Druck von 50 MPa vollflächig erzeugten Verdichtung gleichgesetzt werden kann. Wie die quantitative Betrachtung der Einflüsse in Bild 3-23 verdeutlicht, hebt die damit verbundene Schwindungsdifferenz den starken Einfluss der Siebdruckpaste DP9896 nicht vollständig auf. Die Verstärkung der Sensorbrücke mit einer unverdichteten Lage DP951C2 über der Metallisierung, die gleichzeitig der Kapselung dient, erzeugt eine zusätzliche Spannungskomponente, welche die Deformation kompensiert. Bild 5-12 rechts zeigt einen Schnitt durch die im Fluidkanal aufgehängte Brücke. Sie ist eben im Fluidkanal aufgespannt.

Der Durchflusssensor ist durch die angewendete Technologie kompatibel zu PCR-Reagenzien und Zellflüssigkeiten. Die Sensorkennlinie ist bis zu einem Durchfluss von 0,1 ml/min annähernd linear. Die maximale Übertemperatur, der die biologischen Medien ausgesetzt sind beträgt 80°C [BAR08c].

Damit ist nachgewiesen, dass biokompatible Durchflusssensoren unter ausschließlicher Nutzung von Dickschichttechnologien im Fluidkanal realisierbar sind. Damit können Bioreaktoren, beispielsweise zur Mischung von PCR-Reagenzien, miniaturisiert als komplexes LTCC-Fluidsystem mit integrierter Prozesskontrolle aufgebaut werden. Ergänzt durch den in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten Prozess zur Ventilintegration wird die Möglichkeit zur Realisierung von Fluidregelungen in LTCC-Bauteilen eröffnet.

6 AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit stellt das Prägeverfahren als innovative Ergänzung zur Herstellung von Strukturen im Mikrobereich auf LTCC-Folien vor. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele wurden die sich aus dem Einsatz der Technologie ergebenden Funktionsvorteile aufgezeigt.

Vorteilhafte Bauelementeigenschaften wie guter Wärmetransport, hohe Güte und Strombelastbarkeit, welche sich aus der Leitungsquerschnittsvergrößerung ergeben, eröffnen Anwendungsmöglichkeiten im Leistungsbereich, die bisher anderen, teilweise teureren Technologien vorbehalten blieben. Durch die verbesserte Stromtragfähigkeit, den guten Wärmeübergang und die hohe Temperaturfestigkeit der Keramik, verbunden mit der Integrationsmöglichkeit von Fluidkanälen ist der Aufbau aktiv gekühlter Multi-Chip-Module oder HF-Verstärker in LTCC-Mehrlagentechnik überlegenswert.

Die Erweiterung des Gestaltungsspielraums zum Entwurf fluidischer Bauteile vom Meso-Bereich in den Mikrobereich wurde demonstriert. Geprägte Strukturen zeichnen sich durch eine hohe Oberflächengüte im Vergleich zur konventionellen Herstellung durch Lasern oder Stanzen aus. Feinstrukturen werden mit präziser Kantendefinition gefertigt. Aus der Integrationsmöglichkeit in kleinste Volumina leiten sich neue Anwendungsaspekte der Mehrlagenkeramiktechnologie ab. Fluidelemente in frei tragenden mechanischen Funktionselementen wie Brücken und Membranen ermöglichen Kühlanwendungen für Aktoren, die minimalen Bauraum erfordern. Gasreaktoren und mikrofluidische Logikelemente wie Oszillatoren oder Verstärker, die z.B. zur Fluidkontrolle in Verbrennungsaggregaten dienen, profitieren von der Herstellbarkeit feinsten Kanalgeometrien.

Ein Bestandteil dieser Arbeit ist die Beschreibung des Formgebungsprozesses. Die Charakterisierung der mechanischen Werkstoffeigenschaften bildet die Grundlage zum Verständnis des Abformvorgangs. Unterschiedliche Merkmale wie Zähigkeit, Belastbarkeit, Stauchverhalten oder Verdichtung sind hier untersucht und wesentliche Mechanismen der Formgebung erklärt. Ansätze zur quantitativen analytischen Berechnung definierter Umformstufen sind aufgezeigt. Fortführend ist die Berechnung mit FEM-Werkzeugen sinnvoll. Grundlegende Methoden zur Bestimmung der erforderlichen Materialdaten in Stauchversuchen sind bereits erarbeitet. Die Messmethode ist um die Erfassung von Elastizität und Verdichtung zu erweitern. Als Grundlage für Simulationen des Sintervorgangs zur Dimensionskontrolle und Beherrschung von Materialspannungen sind bereits Schwindungsdaten ermittelt. Diese sollten zur Modellierung der Mikroformung durch Messungen an kleineren Proben ergänzt werden.

Mit Hilfe von DoE-Techniken wurde ein optimales Prozessfenster zum Prägen von DP951 erarbeitet. Die Methode kann weiterführend auf andere Materialien übertragen

werden. Die Formung der Vergleichsfolie CT700 bei höheren Prozesstemperaturen ist ein Erfolg versprechender Ansatz zur Minimierung der beobachteten Dichtgradienten und Verbesserung der Abformung. Schlüssel hierzu ist die Erprobung technisch einsetzbarer Trennmittel und Trockenschmierschichten.

Die hier erarbeiteten Ergebnisse bilden die Grundlage zur Anwendung von Prägeprozessen in der industriellen Produktion. Erste Arbeiten zur serientauglichen Fertigungseinführung des Prägens von Induktivitäten erfolgten im Rahmen des Projektes MIKROFUN. Weitere Aufgabenstellungen leiten sich aus der Qualitätssicherung ab. Die robuste Prozessgestaltung (ROBUST DESIGN) dient der Minimierung von Störeinflüssen. Unter Anwendung dieser Methodik sind Zuverlässigkeitsaspekte in Fertigungsgestaltung und Layoutentwurf weiter zu untersuchen.

Bei der Bauelementefertigung sind Kostensenkungen durch Kombination von Präge- und Stanzschritt erreichbar. Für Großserien kann die Anordnung der Stanzstifte auf dem Prägewerkzeug den seriellen Stanzprozess eliminieren und so Prozesszeit und Kosten einsparen. Der umgekehrte Ansatz ist auf Rapid Prototyping und Kleinserien anwendbar: Werden Prägewerkzeuge in übliche Stanzausrüstungen integriert, können Strukturen seriell ohne werkzeugtechnischen Aufwand geprägt werden.

ANHANG

A 1 Sinterprofile

A 1.1 PEO - Profil DP951

Stufe	Steuerung	Zeit [h:min]	Temperatur Sollwert [°C]	Temperatur Vorgabe [°C]
00	Fh	0:05	100	100
01	Fn	0:50	450	456
02	Fn	1:32	450	456
03	Fh	0:05	450	456
04	Fn	0:10	620	628
05	Fn	0:05	700	710
06	Fn	0:10	810	821
07	Fn	0:10	800	811
08	Fn	0:10	850	862
09	Fn	0:10	800	811
10	Fn	0:30	300	304
11	Fn	0:07	65	65
12	Fn	0:10	40	40
13	Fn	0:10	20	20

Tabelle A-1 : Temperaturprofil zum Sintern von DP951 im Einbrennofen /PEO/.

A 1.2 Nabertherm L3/S, Profil DP 951

Stufe	Temperatur [°C]	Aufheizphase a [min]	Haltephase b [min]
1	481	0:55	1:37
2	881	1:00	0:10
3	831	0:10	0
4	331	0:30	0

Tabelle A-2 : Temperaturprofil zum Sintern von DP951 im Laborofen /Nabertherm/.

A 1.3 Nabertherm - Profil CT700

Stufe	Temperatur [°C]	Aufheizphase a [h:min]	Haltephase b [h:min]
1	450	3:30	0:10
2	920	3:30	0:30
3	20°C	6:00	0

Tabelle A-3 : Temperaturprofil zum Sintern von CT700 im Laborofen /Nabertherm/.

A 1.4 Nabertherm - Profil BGK

Stufe	Temperatur [°C]	Aufheizphase a [h:min]	Haltephase b [h:min]
1	386	3:15	0:45
2	538	1:00	0
3	721	0:30	0
4	913	0:30	0:30

Tabelle A-4 : Temperaturprofil zum Sintern von BGK im Laborofen /Nabertherm/.

A 2 Geräteliste

AccuPyk	Gaspyknometer AccuPyc 1330, Meßgas Helium, Firma Micromeritics
APaar	Rotationsrheometer MCR 301, Messsystem SRF92-SN4655, Temperierkammer CTD 450, Softwareversion RHEOPLUS/32 V3.21, Anton Paar GmbH, http://www.anton-paar.com/DE/en/1
ATV	LTCC Sinterpresse PEO 603, ATV technologie GmbH, 1986, http://www.atv-tech.com
Axiotech	Auflichtmikroskop Axiotech 100 HD, Carl Zeiss, www.zeiss.de/mat
CyberScan	Profilometer Cyber Scan 3D, Cyber Optics Corporation, Minneapolis, Minnesota
Flir	Infrarotkamera A40M, Flir Systems, Objektivauflösung 18µm, http://www.flirthermography.com/media/A40M%20Researcher%20Datasheet.pdf
FRT	Profilometer Micro Prof FRT, Sensor CBL 600, FRT GmbH, www.frt-gmbh.com
HP 4284A	Agilent Hewlett Packard 4284A Precision LCR Meter, www.agilent.com
HP 8753C	Agilent HP 8753C RF Network Analyser, 300kHz bis 6GHz, http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-35293.0.00&cc=US&lc=eng
HPLC	HPLC Mikrokolbenpumpe LC-20AD, Shimadzu Deutschland GmbH, Jena, www.shimadzu.de
Nabertherm	Laborofen Modell L3/S Nr. 9701002, Nabertherm GmbH, 1997, http://www.nabertherm.de
PEO	Programmierbarer Einbrennofen PEO-601, ATV technologie GmbH, 1986, http://www.atv-tech.com
UHL	Video-Messmikroskop VSM ergo, Typ VS3, Walter Uhl GmbH Aßlar, http://www.walteruhl.com/2-messmikroskope/b_vms_ergo/VMS%20ergo_de_b.pdf
Weber	Werkstattpresse bis 20t, Weber GmbH
ZwickM	Materialprüfmaschine Zwick Roell Typ BDO-FB 0.5 TS, 2003, http://www.zwick.de
ZwickW	Materialprüfmaschine Zwick Roell Typ Z010, http://www.zwick.de
8215	Hand Held Digital RS 232 Manometer, Model 8215

VARIABLEN UND FORMELZEICHEN

μ	Prozessmittelwert 82
μ	Reibfaktor 18, 83, 88
$1 : \alpha$	Ventil-Stellverhältnis 111
a	Kantenlänge eines quadratischen Stauchwerkzeugs 18
A	Grenzfläche zwischen Werkzeug und Werkstück 16
α	Ausformwinkel 88
A_0	Grundfläche des Stauchkörpers 45
$A_{1,2}$	Faktorwirkung im Matrixexperiment 81
A_d	Projektionsfläche des Prägewerkzeugs 17, 48
A_p	wirksame Projektionsfläche des Prägestempels 88
A_p^B	Projektionsfläche eines Strukturbereiches 88
B	Geometriefaktor zur Beschreibung der Partikeloberfläche (Abschnitt 1.3.2) 6
B	Stegbreite eingepprägter Feinstrukturen (Zwischenraum) 87
$B_{1,2}$	Faktorwirkung im Matrixexperiment 81
Bow_K	Ausbauchung des Kramikbodens nach dem Sintern 96
Bow_P	Ausbauchung des Kavitätsbodens nach dem Prägen 96
B_W, B_p, B_K	Stegbreite, Index W - Werkzeugmaß, P - geprägtes Maß, K- Maß der gebrannten Keramik 91
$C_{1,2}$	Faktorwirkung im Matrixexperiment 81
D	Partikeldurchmesser 7
$d(dz_N)$	Dimensionsänderung einer beliebigen Stelle in Umformrichtung 14
$d\varepsilon_Z$	lokale technische Dehnung (Stauchung) in Umformrichtung 14
d_K	Dicke der gesinterten Keramik 91
Δp	Druckabfall am Ventilsitz (Abschnitt 5.2.1) 111
Δp	Prägedruckdifferenz 13
ΔR	Grenzschichtdicke zwischen Binder und Partikel 5
D_S	Strukturdichte eines Strukturbereiches 88, 89
ΔT	Übertemperatur am Bauelement 107
ΔV	Volumenänderung 13, 19
dV	differentielles Volumenelement 8
dW_i	an einem Volumenelement verrichtete, differentielle Arbeit 12
dz	Längendifferenzial in Stauchrichtung 14, 15

dz_N	ursprüngliche Größe des betrachteten differentiellen Volumenelementes in Umformrichtung 15
E	Elastizitätsmodul 10
E, \bar{E}	Elastizitätsmodul von Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen 85
ε_h	globale technische Dehnung in Stauchrichtung 14
ε_i	lokale Dehnung in den Hauptkoordinatenrichtungen, Index $i = x, y, z$ 11
$\bar{\varepsilon}_i$	gemittelte lokale Dehnung in den Hauptkoordinatenrichtungen 11
ε_k	globale Dehnung in den Körperachsen, Index b (Breite), l (Länge), h (Höhe) 11
ε^{PL}	plastischer Anteil der technischen Dehnung 14
ε^{VD}	Verdichtungsanteil der technischen Dehnung 14
Φ	Füllstoffgehalt keramischer Massen 5
Φ_{max}	maximaler Füllstoffgehalt 5
F	Prägekraft 17
F, \bar{F}	Prägekraft an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen 84
F	Zielfunktion des Matrixexperiments 81
f	Füllhöhe an Feinstrukturen 68, 70
$f_{p, F, K}$	Füllhöhe an geprägten Feinstrukturen, Index W - Werkzeugmaß, P - geprägtes Maß, K - Maß der gebrannten Keramik 91
F_D	Dichtkraft 110
φ_i	Umformgrad in den Hauptkoordinatenrichtungen x, y, z 11
F_i	Fehlererwartungswert 82
φ_k	globaler Umformgrad in den Körperachsen, Index b (Breite), l (Länge), h (Höhe) 12
φ^{PL}	Umformgrad 17
φ_z^{PL}	Umformgrad in Stauchrichtung 15
φ^{VD}	Verdichtungsgrad 14, 16, 17
φ_z^{VD}	Verdichtungsgrad in Stauchrichtung 15
F_{St}	Stauchkraft 48
G	Schubmodul 10
γ	Deformation (Dehnung) bei Scherbelastung 20, 31
γ_1	zeitabhängige, elastische Deformation 20
γ_2	irreversibler Deformationsanteil 20
γ_3	zeitunabhängiger, elastischer Deformationsanteil 20
γ_{EL}	elastische Deformation im Kriechversuch 21, 38

γ_{LVE}	Grenzdehnung des linear viskoelastischen Bereiches 31, 38
γ_{max}	Maximalwert der Deformation im Kriechversuch 21, 38
γ_{PL}	plastische Deformation im Kriechversuch 21, 38
G, \bar{G}	Schubmodul an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen 85
G^*	komplexer Schermodul 22
G'	Speichermodul 22, 31
G''	Verlustmodul 22, 31
G''_{K}	Verlustmodul des Kompositwerkstoffs 6
G''_{P}	Verlustmodul der Polymermatrix 6
G_{H}	Schubmodul des Hookschen Anteils 20
G_{KV}	Elastizität des Kelvin-Voigt-Elementes (zeitabhängig) 20
h	Momentanwert der eingepprägten Foliendicke 18, 88
h_0	Stapelhöhe der Grünfolien 45
h_{Z0}	ursprüngliche Werkstückhöhe 14
h_{Z1}	gestauchte Werkstückhöhe 14
η_{B}	Viskosität des Binders 5
η_{KV}	Viskosität des Kelvin-Voigt-Elementes 20
η_{N}	Newtonsche Viskosität (einer idealen Flüssigkeit) 20, 39
η_{r}	relative Viskosität einer Suspension 5
η_{S}	Viskosität der Suspension 5
$I_{\Delta T=15\text{K}}$	Strombelastbarkeit bei einer Übertemperatur von 15 K 107
k	Kompressibilität von Grünfolien 13, 56
k, \bar{k}	Kompressibilität von Grünfolien an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen 86
k	Druckübertragungsrate zwischen Stempel und Werkstück 83
k_{E}	Einstein-Konstante zur Beschreibung des Einflusses der Partikelform 5
k_{f}	Fließspannung 10
$k_{\text{f}}, \bar{k}_{\text{f}}$	Fließspannung an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen 85
k_{w}	Umformwiderstand (zeitabhängiger Momentanwert der Spannung) 17, 43, 88
k_{wm}	mittlerer Umformwiderstand für einen Umformschritt 45
k_{H}	Konstante zur Beschreibung von Teilchenwechselwirkungen 5
$K_{\text{E}}, K_{\text{G}}$	elastische Ähnlichkeitskennzahlen für Normal- und Schubbelastung 85

K_{PL}	Ähnlichkeitskennzahl für plastostatische Ähnlichkeit	84
K_R	Ähnlichkeitskennzahl der Reibung	85
K_{VD}	Ähnlichkeitskennzahl der Verdichtung	86
λ	Zeitkonstante der Deformationsfunktion	21
L, \bar{L}	Abmessung an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen	84
L	Länge eines einzuprägenden Strukturbereiches	87
$L(x)$	Blindanteil der abstandsabhängigen Impedanz einer Messspule	107
m	Reibfaktor	85
m, \bar{m}	Reibfaktor an Original und Modell bei Ähnlichkeitsbetrachtungen	85
m_F	Kraftmaßstab	84, 85
m_L	Längenmaßstab	84, 85
ν	Querkontraktionszahl	10
\bar{n}	Exponent der Verlustmodulfunktion von Kompositmaterialien	6
P	Porosität	13
P	Periode (Abstand periodisch wiederkehrender Feinstrukturen)	87
p_P	Prägedruck	51, 71, 83
Q	Spulengüte (Leerlaufgüte)	107
Q_V	Volumenstrom	110
R	ohmscher Widerstand	107
R	Stempelbreite der Presse	83
$R(x)$	Verlustanteil der abstandsabhängigen Impedanz einer Messspule	107
ρ_0	Dichte der unverdichteten Grünfolie	13
ρ_F	Dichte des Feststoffanteils	13
ρ_S	scheinbare Dichte des Verbundwerkstoffes	13
ρ_s	Sinterdichte der Probekörper im Verdichtungsversuch	50
R_{Fl}	Fluidischer Widerstand (Leckagewiderstand)	111
$R_{L(G)}$	Leckagewirdestand des geschlossenen Ventils	111
$R_{L(O)}$	Leckagewiderstand des geöffneten Ventils	111
R_{Th}	thermischer Widerstand	107
s_{ij}	Spannungsdeviator	9
σ_{ij}	Spannungstensor	8
s_k	Schwindungskomponenten in den Hauptkoordinatenrichtungen	19
σ_{kk}	Normalspannungen in den Hauptachsrichtung X, Y, Z	8
σ_m	hydrostatischer Spannungsanteil	9

s_{rel}	Weg bei Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug	16
σ_V	Vergleichsspannung	10
σ_V von Mises	Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsarbeitshypothese	10
σ_{VTresca}	Vergleichsspannung nach der Hypothese von Tresca	10
$\sigma_{X,Y,Z}$	Spannungskomponenten in den Hauptachsrichtungen	8
σ_Z	eingeprägte Druckspannung beim Stauchen (in Umformrichtung)	14, 43
$\sigma_Z(z)$	Spannungsgradient in Stauchrichtung	83
σ_{Zm}	mittlere Spannung in Stauchrichtung (örtlicher Mittelwert)	18
τ_0	eingeprägte Schubspannung	20
τ_B	Bruchspannung bei Scherbelastung	23
τ_F	Fließspannung bei Scherbelastung	31, 85
τ_{ij}	Schubspannungskomponenten	8
τ_{LVE}	Grenzspannung des linear viskoelastischen Bereiches	22, 31
τ_{max}	eingeprägte Schubspannung im Kriechversuch	37
τ_R	Reibschubspannung	16, 85
t_{Bel}	Belastungszeit im Kriechversuch	21
t_K	Kavitätstiefe nach dem Sintern	92
t_P	Prägetiefe	91
t_R	Endwert der eingepägten Foliendicke	88
t_f	Foliendicke der zu prägenden Grünfolie	18, 88, 91
t_{tr}	Abklingzeit der transienten Vorgänge im Kriechversuch	21, 38
t_W	Werkzeugtiefe (Strukturhöhe auf dem Prägestempel)	88, 92
$t_{W,P,K}$	Strukturtiefe, Index W - Werkzeugmaß, P - geprägtes Maß, K- Maß der gebrannten Keramik	91
u_V	Volumenänderung vom unverdichteten zum gebrannten Zustand	19
u_i	Dimensionsänderungen vom unverdichteten zum gebrannten Zustand in den Hauptkoordinatenrichtungen, Index $i = x, y, z$	19
V	Volumen	13
V_0	Bezugsvolumen	13, 45
V_A^H	horizontales Abformverhältnis	92
V_A^V	vertikales Abformverhältnis	91
V_d	Volumen des verdichteten Grünkörpers	19
V_E^H	horizontales Entwurfsverhältnis	92
V_E^V	vertikales Entwurfsverhältnis	92
V_F	Füllverhältnis, Erreichte Formfüllung an Feinstrukturen	92

V_P^H	horizontales Prägeverhältnis	89
V_P^V	vertikales Prägeverhältnis	89
V_S^H	horizontales Strukturverhältnis	89
w	spezifische Formänderungsarbeitsdichte	13
w_D	spezifische Deformationsarbeit	17
w_{EL}	spezifische elastische Formänderungsarbeit	17
w_G	Gestaltänderungsanteil der im Volumenelement gespeicherten elastischen Energie	9
w_{PL}	spezifische Umformarbeit	17, 51
w_{St}	spezifische Staucharbeit	45
w_{VD}	hydrostatischer Anteil der im Volumenelement gespeicherten elastischen Energie	9
w_{VD}	spezifische Verdichtungsarbeit	17, 51
ω	Erregerfrequenz	22, 108
W	Linienbreite eingepprägter Feinstrukturen	87
W_D	Deformationsarbeit	16
W_{EL}	elastische Verformungsarbeit	16
W_{PL}	Umformarbeit	16
W_R	Reibungsarbeit	16
W_{St}	Staucharbeit	16
W_{VD}	Verdichtungsarbeit	16
$W_{W, P, K}$	Prägestrukturbreite, Index W - Werkzeugmaß, P - geprägtes Maß, K-Maß der gebrannten Keramik	91
X	Breite des einzuprägenden Strukturbereiches	87
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	Mittelwerte der Prüfkörpermaße im Verdichtungsversuch	49
X_0, Y_0, Z_0	Maße im unverdichteten Zustand in den Hauptkoordinatenrichtungen	19, 49
X_d, Y_d, Z_d	Maße des verdichteten Grünkörpers in den Hauptkoordinatenrichtungen	19, 50
X_s, Y_s, Z_s	Maße der gesinterten Keramik in den Hauptkoordinatenrichtungen	50
Z	Werkstückhöhe in Stauchrichtung	84
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$...	Längenänderungen in den Hauptkoordinatenrichtungen	19

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

- ALB 03 A. Albrecht: Alternative way to high current structures in LTCC, Proc. Europ. Microelectron. Packaging Conf. Friedrichshafen, 2003
- BAL 05 H. Baltes, O. Brand, G. K. Fedder: Microengineering of Metals and Ceramics. Design, Tooling, and Injection Molding: Design, Advanced Replication Techniques and Properties, Wiley-VCH, 2005
- BAR 07a H. Bartsch de Torres, M. Hoffmann: Embossing of fluidic channels into ceramic multilayer, Smart Systems Integration Conference Proc. 2007, 423-425
- BAR 07b H. Bartsch de Torres, M. Fischer, M. Klett, C. Augspurger, A. Schober, M. Hoffmann: Funktionskeramiken für biotechnologische Anwendungen, 3. Thüringer Grenz- und Oberflächentage, Ed. Innovent e.V. Jena, 2007
- BAR 08a H. Bartsch de Torres, M. Fischer, R. Gade, M. Mach, J. Müller M. Hoffmann, B. Pawlowski and S. Barth: A new method for wafer level integration of silicon components on LTCC, Smart Systems Integration Conference Proc. 2008, 392-394
- BAR 08c H. Bartsch de Torres, C. Rensch, T. Thelemann, J. Müller, M. Hoffmann: Fully Integrated Bridge-type Anemometer in LTCC-based Microfluidic Systems, Journal of Advances in Science and Technology, Vol. 54, 2008, 401-404
- BAR 08d H. Bartsch de Torres, M. Fischer, J. Müller, M. Hoffmann: Schlussbericht zum Projekt Nano-SilKe, Verbundnummer W3MNI025, 2008
- BAR 08e H. Bartsch de Torres, R. Gade, A. Albrecht, M. Hoffmann: Systematic characterisation of embossing processes for LTCC-tapes, Journal of Microelectronics and Electronic Packaging (2008) 5, 142-149
- BAR 89 H.A. Barnes, J.F. Hutton, K. Walters: An Introduction to Rheology, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1989
- BUC 06 C. Buchheim, G.Kittler, V. Cimalla, V. Lebedev, M. Fischer, S. Kriechok, V. Yanev, M. Himmerlich, G. Ecke, J.A. Schaefer, O. Ambacher: Tuning of surface properties of AlGaIn/GaN sensors for nanodroplets and picodroplets, IEEE Sensors Journal 6(4), 2006
- BÜR 09 Regelkreis-Stellventile, Bürkert GmbH, http://lehrer.schule.at/hi/download/Regelkreis-Stellventile_buerkert.pdf, Broschüre, 2009
- CDA 09 <http://www.cda.de/index.php>
- DAH 93 W. Dahl, R. Kopp, O. Pawelski: Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde, Verlag Stahleisen, Düsseldorf und Springer-Verlag, Berlin, 1993
- DUP 01 Datenblatt "Fodel® 6453 Ag Cofireable Fine Line Photoimageable Conductor", DuPont Microcircuit Materials, 2001
- DUP 04 Low Temperature Cofire Dielectric Tape 951 Green Tape™ Product Selector Guide, Rev 10/04, DuPont United Kingdom Ltd, GB-Bristol

- BS16 1QD, 2004
- DUP 95 Product Data Sheet 5091D / 5092D / 5093D PTC Thermistor Compositions, DuPont Electronic Materials, 1995
- DUR 06 AHC Oberfläche, Firmenschrift der AHC-Oberflächetechnik GmbH, 2006, 91-97
- DUR 08 <http://www.aimt-group.com/213-0-verfahrensvariante-ptfe-durni-disp.php>
- ESP 98 P. Espinoza-Vallejos, J. Zhong, M. Gongora-Rubio, L. Sola-Laguna, J. J. Santiago-Aviles: Meso (Intermediate) Scale Electromechanical Systems for the Measurement and Control of Sagging in LTCC Structures, MRS Symp. Proc. (518), 1998, 73-79
- EWO 07 R. H. Ewoldt, G. H. McKinley: Creep Ringing in Rheometry or How to Deal with Oft-discarded Data in Step Stress Tests! Rheology Bulletin, 76(1) January 2007, 4-24
- FIS 09 M. Fischer, H. Bartsch de Torres, B. Pawlowski, R. Gade, S. Barth, M. Mach, M. Stubenrauch, M. Hoffmann, J. Müller: Silicon on Ceramics - A new Integration Concept for Silicon Devices to LTCC, J. of Microelectronics and Electronic Packaging (2009) under review
- GAR 74 R.A. Gardner, R.W. Nufer: Properties of Multilayer Ceramic Green Sheets, Solid State Technology, May 1974, 38-43
- GAU 01 L. J. Gauckler: Herstellung von Keramik, Bd. 2, Vorlesung Wintersemester 2000/2001, ETH Zürich, Nichtmetallische Werkstoffe
- GEI 08 T. Geiling, H. Bartsch de Torres, R. Perrone, J. Müller, M. Hoffmann: Coil Design for a Low-loss Inductive Proximity Sensor in LTCC, IBER-SENSOR Proc. 2008
- GER 06 Gerald Gerlach, Wolfram Dötzel: Einführung in die Mikrosystemtechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006
- GFD 09 Metall-O-Ringe und C-Ringe für extreme Betriebsbedingungen, 2009, http://www.gfd-dichtungen.de/downloads/Metall_Ringe_D.pdf
- GIB 07 J. Giboz, T. Copponnex, P. Mélé: Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review, J. Micromech. Microeng. 17 (2007), R96-R109
- GIL 00 J. R. Gillmann, P. Espinoza Vallejos, L. Sola-Laguna, J.J. Santiago Aviles: Electromagnetically actuated diverting valve using LTCC tapes, Electrochemical Society Proceedings, Vol. 200-19, 89-94
- GOL 06 L. J. Golonka, T. Zawada, J. Radojewski, H. Roguszczyk, M. Stefanow: LTCC Microfluidic System, Int. J. Appl. Ceram. Technol., 3 (2) (2006), 150-156
- GON 02 M. Gongora-Rubio, M. B. A. Fontes, E. Wagner Simões, J. Santiago-Aviles: LTCC hybrid technology applied to water quality meso analytical system, SBM 2002
- GON 99 M. R. Gongora-Rubio, L. Sola-Laguna, M. Smith, J.J. Santiago-Aviles: A meso-scale electromagnetically actuated normally closed valve realized on LTCC tapes, SPIE Vol. 3877, 1999, 230-239

-
- GRO 06 L. Grossmann: Modellierung der Pressagglomeration feinkörniger, kohäsiver und kompressibler Schüttgüter, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006
- GRO 08 G.A. Groß, T. Thelemann, S. Schneider, D. Boskovic, J.M. Köhler: Fabrication and fluidic characterization of static micromixers made of low temperature cofired ceramic (LTCC), Chemical Engineering Science 63 (2008) 2773– 2784
- GUP 00 R. K. Gupta: Polymer and Composite Rheology, Marcel Dekker, New York-Basel, 2000
- HAR 01 C. A. Harper: Handbook of Ceramics, Glasses and Diamonds, McGraw-Hill Inc, 2001
- HER 08 Datenblatt CT 700, Version 1.0, W.C. Heraeus GmbH, 2008, http://heraeus-thickfilm.com/media/webmedia_local/media/datasheets/ltcc-materials/ct_700_en_3.pdf
- HIN 05 M. Hintz, A. Albrecht, K.-H. Drüe: Verfahren zur Beschichtung von Keramikfolien mit Wirkstrukturen sowie Verfahren zur Herstellung eines Keramikverbundes aus diesen, Offenlegungsschrift DE 10 2004 023 674 A1, 2005
- HIN 07 M. Hintz: Druckunterstütztes Sintern als Grundlage neuer Technologievarianten für LTCC, Dissertation, TU Ilmenau, 2007
- HIT 08 Datenblatt Anodic Bondable LTCC Tape BGK, Hermsdorfer Institut für technische Keramik e.V. 2008
- HLA 07 H. P. Maw, S. C. Wai, R. T. Tjeung, L. C. Wai, L. B. Keng, S. Xuechuan: Micro Embossing of LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) Green Substrates, 9th Electronics Packaging Technology Conference, IEEE 2007, 510-513
- IKT 09 http://www.ikts.fraunhofer.de/intelligente_materialien_und_systeme/Di-piezo-undferroelektrischeKeramiken/index.jsp
- IMA 00 Y. Imanaka: Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology, Springer Science+Business Media Inc. 2005
- KIM 00 J. D. Kim: LTCC-M Technology for PDP Back Panel, IDMC 2000, www.ltcc-m.com/pdf/IDM2000.pdf
- KLE 04 B. Klein: Versuchsplanung DoE, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004
- KNI 01 R. Knitter, R. Lurk, M. Rohde, S. Stolz, V. Winter: Heating Concepts for Ceramic Microreactors, 5th International Conference on Microreaction Technology IMRET 5, May 2001, Springer Verlag, 86-93
- KOP 98 R. Kopp, H. Wiegels: Einführung in die Umformtechnik, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1998
- LAI 05 Y. Lai: Eddy Current Displacement Sensor with LTCC Technology, Dissertation Albert-Ludwig-Universität, Freiburg, 2005
- LÄR 92 F. Lärmer, A. Schilp: Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silicium, Patent DE4241045, 1994
-

- LI 08 J. M. Li, C. Liu, H. C. Qiao, L. Y. Zhu, G. Chen, X. D. Dai: Hot embossing/bonding of a poly(ethylene terephthalate) (PET) microfluidic chip, J. Micromech. Microeng. 18 (2008) 015008 (10pp)
- LUN 99 H. Lunch, J. Park, P.A. Espinoza-Valejos, J.J. Santiago-Aviles, L. Sola-Laguna: Meso-scale pressure transducers utilizing low temperature co-fired ceramic tapes, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 566, 1999, 177-182
- MEZ 00 T. Mezger: Das Rheologie-Handbuch, Herausgeber: Dr. Ulrich Zorll, Vincentz, 2000
- MIK 09 Abschlussbericht Projekt "Serientaugliche Fertigungsverfahren für mikrostrukturierte Induktivitäten mit erweitertem Funktions- und Parameterbereich - MikroFun -", BMBF, Förderkennzeichen 02PI1047, 2009
- MIM 09 <http://www.pulverspritzgiessen.de/metallspritzguss.php>
- MUN 00 J.D. Mun, I.T. Kim, C.R. Cho, K.T. Hwang: Development and Characteristics of a 25-in. XGA PDP Using LTCC-M Technology, SID 02 Digest, 1064-1067
- PAN 07 C. T. Pan, T. T. Wu, Y. C. Chang, J. C. Huang: Experiment and simulation of hot embossing of a bulk metallic glass with low pressure and temperature, J. Micromech. Microeng. 18 (2008) 025010 (12pp)
- PAR 00 Y. H. Park, C. R. Cho, I. T. Kim, M. W. Lee, K. T. Hwang, J. D. Yu, J. D. Mun: Fabrication of 165 μm Pitched PDP Back Panel Based on LTCC-M Technology, SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 31, Issue 1, 2000, 478-481
- PER 07 R. Perrone: Erweiterung des Frequenzbereiches und der Integrationsdichte von LTCC-Modulen mittels Photostrukturierung und Designoptimierung, Dissertation, TU Ilmenau, 2007
- PER 09 R. Perrone, H. Bartsch de Torres, M. Hoffmann, M. Mach, J. Müller: Filling methods for embossed low resistance fine line coils in LTCC, Journal of Microelectronics and Electronic Packaging (2009), under review
- PET 05 K.A. Peterson, K.D. Patel, C.K. Ho, S.B. Rohde, C.D. Nordquist, C.A. Walker, B.D. Wroblewski, M. Okandan: Novel Microsystem Applications with New Techniques in LTCC, CICMT 2005
- PIC 09 <http://www.piceramic.de/technologie.html>
- RAB 06 T. Rabe, P. Kuchenberger, B. Schulz: Hot Embossing - An Alternative Method to Produce Cavities in Ceramic Multilayer, IMAPS Conference, 2006
- RAT 03 B. Rattay: Untersuchung der Einflussgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastungen beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in metallische Bleche, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2003
- REB 03 L. Rebenklau: Beiträge zum Aufbau und zur Technologie LTCC-basierter mikrofluidischer Bauelemente und Systeme, Dissertation, TU Dresden, 2003
- RIC 04 K. Richter, D. Fischer: Offenlegungsschrift DE 103 18 568 A1 2004.11.25, 2004

-
- RIE 09 http://de.wikipedia.org/wiki/Reaktives_Ionentiefen%C3%A4tzen
- ROA 98 S. D. Roach: Designing and Building an Eddy Current Position Sensor, Hewlett-Packard, Electronic Measurements Division, 1998, <http://archives.sensorsmag.com/articles/0998/edd0998/index.htm>
- SCH 05 Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, 10. bis 12. Oktober 2005, Freiburg; Margret Schneider Ed., 2005
- SCH 73 E. Scheffler: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
- SHA 08a X. Shan, H.P. Maw, R.T. Tjeung, S.H. Ling, C.W. Lu, R. Jachowicz: Microstructure formation on low temperature co-fired ceramic green substrates using micro embossing, *Microsyst Technol* (2008), 1405-1409
- SHA 08b X. Shan, Y. C. Soh, C. W. P. Shi, C. K. Tay, K. M. Chua, C. W. Lu: Large-area patterning of multilayered green ceramic substrates using micro roller embossing, *J. Micromech. Microeng.* 18 (2008) 065007 (8pp)
- SHE 99 A. V. Shenoy: Rheology of Filled Polymer Systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999
- SHI 08 P. P. Shiu, G. K. Knopf, M. Ostojic, S. Nikumb: Rapid fabrication of tooling for microfluidic devices via laser micromachining and hot embossing, *J. Micromech. Microeng.* 18 (2008) 025012 (8pp)
- TEM 09 <http://www.temicon.com/index.php/en/micro-nano-mould-inserts>
- TFT 07 Datenblatt PST-CARB-SP, Thick Film Technologies, Everett, USA, <http://www.thickfilmttech.com/index.html>
- THE 05 T. Thelemann: Die LTCC-Technologie als Basis von sensorischen, aktorischen und fluidischen Komponenten für Mikrosysteme, Dissertation TU Ilmenau, 2005
- THE 07 T. Thelemann, J. Müller, M. Fischer, A. Groß: "LTCC based fluidic components for chemical applications", *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 4(4), 2007, 167-172
- VAE 04 K. Vaed, J. Florkey, S. A. Akbar, M. J. Madou, J. J. Lannutti, S. S. Cahill: An Additive Micromolding Approach for the Development of Micromachined Ceramic Substrates for RF Applications, *J. of Microelectromechanical Systems*, 13 (2004) 514-525
- VET 02 G. Vetter (Hrsg.): Handbuch Dosieren, 2. Aufl., Vulkan Verlag GmbH, 2002
- WAG 04 M. Wagner: Prozessparameter und ihr Einfluss auf die Schwindungsgenauigkeit von Hochintegrierten keramischen Mehrlagenschaltungen, Dissertation, TU Erlangen, 2004
- WIK 09 http://de.wikipedia.org/wiki/Biogener_Schmierstoff
- WIS 72 G. Wischers, M. Lusche: Einfluss der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton, *Beton-technische Berichte* 18 (1972), 137
- XMA 09 http://www.pb.izm.fhg.de/match-x/haupt/main_de_frmset.html?system
-

- YAN 04 V. Yanev: Erzeugung, Charakterisierung und Strukturierung von Fluorocarbon-Plasmapolymeren für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik, Dissertation TU Ilmenau, 2004
- YON 07 Y. He, J. Z. Fu, Z. C. Chen: Research on optimization of the hot embossing process, J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 2420-2425
- YOU 07 S.-W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, S. Oyama, Y. Oshinomi, K. Matsutani, R. Maeda: Fabrication of a micro patterned parylene-C master by hot embossing and its application to metallic mold replication, J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 1402-1413
- YOU 08 S.-W. Youn, T. Noguchi, M. Takahashi, R. Maeda: Dynamic mechanical thermal analysis, forming and mold fabrication studies for hot-embossing of a polyimide microfluidic platform, J. Micromech. Microeng. 18 (2008) 045025 (9pp)

THESEN

1. Die Formänderung verdichtbarer Körper unter Druckeinwirkung wird durch die Kohäsion des Binders und die Adhäsion zwischen Binder und Füllstoffen bestimmt. Die logarithmischen Größen Umformgrad und Verdichtungsgrad beschreiben plastische Verformung und Verdichtung skalierbar. Die vorzeichenbehaftete Summe der Formänderungen nach Abzug des Verdichtungsanteils ist gleich Null. Durch Anwendung der hergeleiteten Beziehung ist die spezifische Umform- und Verdichtungsarbeit bei Stauchbelastung für konkrete Umformstufen aus dem Umform- und Verdichtungsgrad extrahierbar.
2. DP951 unterscheidet sich bei 60°C durch einen hohen Anteil der plastischen Verformung unter Scherbelastung bzw. Druckbelastung sowie geringe Kompressibilität und Schwindung von den Vergleichsfolien. Verdichtungs- und Schwindungsverhalten resultieren aus dem hohen Feststoffanteil, erreicht durch eine mehrmodale Kornverteilung der Pulverbestandteile.
3. Hochvermengte Matrixexperimente nach TAGUCHI eignen sich zur Prägeprozessoptimierung. Hoch signifikanten Einfluss auf die Formfüllung von Feinstrukturen in DP951 hat die Schmierung. Bei der Parameterwahl muss ein Kompromiss zwischen Formfüllung und Entformbarkeit eingegangen werden. Die Begrenzung der Temperatur auf 60°C und die Schmierung mit Leinöl ergibt eine optimale Abformung und Entformbarkeit von Feinstrukturen bei Prägedrücken zwischen 90MPa und 120MPa.
4. Das Abformverhalten einer Anordnung ergibt sich aus ihrem Umformwiderstand. Der Geometrieinfluss ist dabei durch dimensionslose Verhältnisgrößen beschreibbar.
5. Die Spannungsverteilung an Kavitäten ist geometrisch durch die dimensionslosen Prägeverhältnisse in horizontaler und vertikaler Richtung als Quotient von Werkzeuggeometrie und Foliendicke gegeben.
6. Die Spannungsverteilung an Feinstrukturen ist geometrisch durch das vertikale Prägeverhältnis sowie das Strukturverhältnis und die Strukturdichte als horizontale Geometriegrößen bestimmt.
7. Aus der geringen Kompressibilität, hohen spezifischen Staucharbeit und geringen Scherfestigkeit der Grünfolie DP951 und der geringen Schwindung resultiert die Abformung von Feinstrukturen mit einem großen Entwurfsverhältnis in der Keramik.
8. Die geringe spezifische Staucharbeit, Scherfestigkeit sowie die hohe Verdichtung und Schwindungsrate bewirken die Abformung von Kavitäten mit großem Entwurfsverhältnis in der Keramik BGK.
9. Dichtegradienten im Grünkörper entstehen bei hoher innerer Reibung bei gleichzeitig hoher Scherfestigkeit. Eine Temperaturerhöhung bewirkt die Abnahme der inneren Reibung (Verlustmoduln) der Grünfolien.
10. Beim Prägen erzeugte Dichtegradienten in horizontaler Richtung bewirken die Abnahme der lokalen Schwindungsrate in der Umgebung geprägter Strukturen. Die Größe der geprägten Strukturbereiche ist reproduzierbar und unabhängig vom Prägeverhältnis.

11. Die Lagetoleranzen geprägter Strukturen werden durch das Abformwerkzeug bestimmt. Bei prozessüblicher Lagerung geprägter Grünfolien des Materials DP951 in Stickstoffatmosphäre bleiben die Lagetoleranzen stabil.
12. Fluidische Kanäle sind ohne Sinterhilfsmittel und flüchtige Einlagen durch Verminderung des Druckes auf 4 MPa oder weniger bei uniaxialer Lamination in DP951 herstellbar. Die Herstellung von Kanälen mit Breiten von 35 μm bis 400 μm und einer Höhen von 20 μm bis 40 μm mit dieser Methode ist nachgewiesen.
13. Feine Fluidkanäle sind in frei tragende Brücken integrierbar. Zur Spannungskontrolle eignet sich ein hochvermengtes Matrixexperiment nach TAGUCHI. Die durch die Verdichtung eingebrachten Spannungseinflüsse werden durch die Verwendung von Karboneinlagen kompensiert.
14. Prägen von Siebdruckschichten bewirkt eine Verminderung der mittleren Rauheit R_a . Damit verbunden ist die Verbesserung der Dichteigenschaften von gedruckten metallischen Dichtsitzelementen auf das dreifache Stellverhältnis bei einer Dichtkraft von 3 N.
15. Ausgedehnte Fluidkammern mit einem Durchmesser von 10 mm und geprägten Dichtstrukturen sind durch Füllen des Hohlraums mit Karbonpaste monolithisch unter Verwendung von LTCC-Standardsinterprofilen in DP951 herstellbar.
16. Die Vergrößerung der Leiterdicke durch Anwendung des Prägeverfahrens auf bis zu 50 μm im gebrannten Zustand ist nachgewiesen. Dadurch ergibt sich eine Gütesteigerung, die beim Aufbau von Senserspulen nach dem Wirbelstromprinzip zu einer Verdopplung der Empfindlichkeit geprägter Spulen im Vergleich zu gedruckten Spulen führt.

ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich oder unentgeltlich geholfen:

Keine

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Ilmenau, den 30.06.2009

Heide Barsch

